Marijan Kalea

# ELEKTRIČNA ENERGIJA

Kigen

*Marijan Kalea*

*ELEKTRIČNA ENERGIJA*

*Izdavač*
Kigen d.o.o. Zagreb

*Za izdavača*
Nenad Lihtar

*Urednik*
Vera Vujović

*Recenzenti*
Akademik Božo Udovičić
Prof. emeritus Zijad Haznadar
Dr. sc. Mladen Zeljko
Josip Moser, dipl. ing

*Lektorica*
Vera Vujović

*Grafički urednik*
Igor Gorkič
PAR.nas dizajn

*Oblikovanje naslovnice*
Sandra Ilievski

*Tisak*
GZH d.o.o.

CIP zapis dostupan u računalnom katalogu
Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu
pod brojem 649184.

Ni jedan dio ove knjige ne smije se umnožavati
bez prethodne suglasnosti Izdavača i Autora.

ISBN 953-6970-39-1

Marijan Kalea

# ELEKTRIČNA ENERGIJA

Kigen
*Zagreb, studeni 2007.*

*Svojim milim unučicama*
*Luciji i Petri,*
*posvećujem.*

# Predgovor

Zgotovljujući svoju prvu knjigu „Prijenos električne energije, što je to?“, mnoge sam stvari morao staviti *na stranu.* Nisu se uklapale u koncept te knjige, nego u neki širi koncept. Tako je narastala moja spoznaja kako je taj širi koncept zapravo *električna energija*, fenomen kojim sam se bavio cijeloga profesionalnog života, još od vremena svog školovanja. Dakako, neke dodirne stvari iz prve knjige morao sam ponovo opisati i u ovoj knjizi jer naprosto pripadaju ovamo, a iznesene su u drugačijem kontekstu.

*Električna energija dolazi iz utičnice* – dio javnosti tako poima tu doista najdemokratskije dostupnu energiju suvremenog svijeta. Ova knjiga namijenjena je onima koje zanima što je *iza* utičnice; čitateljima zainteresiranim za poimanje električne energije, njezino stvaranje i dopremu do kuća u kojima živimo, tvornica i ustanova gdje radimo. To je skup izabranih poglavlja kojima se nastoji uputiti *u osnove* tog vrlo složenog područja u što širem kontekstu. Od širokog prostornog zahvata (to je svijet, ali naglašenije Europa i Hrvatska), preko vremenskog zahvata (to je posljednjih stotinjak godina, ali naglašenije nekoliko posljednjih desetljeća, a donekle i predstojećih nekoliko desetljeća), do, dakako, smještaja proizvodnje, prijenosa i distribucije električne energije, opskrbe te korištenja električnom energijom, u ukupnu energetiku.

Poglavlja u knjizi iznesena su u najgrubljim potezima, rekao bih skicama, jer iza svakog od tih poglavlja stoji barem jedan kolegij i odgovarajući udžbenik za pojedine predmete koji se izučavaju u okviru studija elektroenergetike.

Međutim, knjiga može poslužiti i studentima elektrotehnike/elektroenergetike, kao šira dopuna udžbenicima, te novinarima, političarima i – u krajnjoj liniji – svim energetičarima kojima električna energija nije uža specijalnost, ali bi htjeli biti načelno informirani i o njoj. Konačno, mogu je koristiti i *elektroprivrednici*, kojima bavljenje užom specijalnošću – tehničkom, ekonomskom i pravnom – nije dalo vremena za općenitija i sustavnija sagledavanja fenomena kojim se zapravo svakodnevno bave: električnoj energiji.

Zahvaljujem se recenzentima ove knjige, koji su svaki sa svoje strane dali niz korisnih savjeta i sugestija: akademiku Boži Udovičiću, doktoru znanosti Zijadu Haznadaru, profesoru emeritusu Sveučilišta u Zagrebu i akademiku Akademije nauka Bosne i Hercegovine, doktoru znanosti Mladenu Zeljku i diplomiranom inženjeru Josipu Moseru. Nastojao sam uzeti u obzir njihove savjete, onako kako sam znao i umio.

Zahvaljujem i *Kigenu*, osobito njegovu direktoru Nenadu Lihtaru i urednici teksta Veri Vujović, kao i grafičkom uredniku Igoru Gorkiču, koji su se pobrinuli da knjiga izađe dolično uređena i opremljena.

U Osijeku, srpanj 2007. godine

M. Kalea

# Sadržaj


1. Oblici energije ..... 11
2. Iskazivanje (elektro)energetskih veličina ..... 25
3. Energetika svijeta početkom trećeg tisućljeća ..... 59
4. Povijesni put korištenja električnom energijom ..... 75
5. Električna energija ..... 95
6. Proizvodnja električne energije – elektrane ..... 117
7. Prijenos i distribucija električne energije – mreže ..... 161
8. Elektroenergetski sustavi i njihovo povezivanje ..... 193
9. Snaga i energija u elektroenergetskom sustavu ..... 215
10. Gubici i vlastita potrošnja električne energije ..... 241
11. Godišnja elektroenergetska bilanca ..... 253
12. Pogon i održavanje elektroenergetskog sustava ..... 259
13. Razvoj i izgradnja elektroenergetskog sustava ..... 273
14. Utjecaj elektroenergetike na okoliš ..... 283
15. Razborito korištenje električnom energijom ..... 297
16. Kvaliteta električne energije ..... 309
17. Zaštita zdravlja i imovine pri korištenju električnom energijom ..... 317
18. Organiziranje elektroenergetskog gospodarstva – elektroprivrede ..... 327
19. Direktive Europske Unije o električnoj energiji ..... 337
20. Zakonodavno uređenje elektroenergetskog sektora u Hrvatskoj ..... 355
21. Cijene električne energije ..... 377
22. Povijest elektrifikacije u Hrvatskoj ..... 405
23. Električna energija u predstojećem razdoblju ..... 439

Kazalo pojmova ..... 453

Literatura ..... 461

Životopis autora ..... 465

# 1

# Oblici energije

Energija je presudni čimbenik opstanka ljudske vrste, poput zraka, hrane i vode...

Do pred kraj 19. stoljeća, energija tada raspoloživih prirodnih izvora energije morala se dopremati na mjesto korištenja (drvo, ugljen, nafta), ili se mjesto njihova pridobivanja moralo slagati s mjestom njihova korištenja (vodne snage, vjetar). Tek krajem 19. stoljeća dolazi do početaka korištenja električnom energijom i primjene električnog prijenosa energije na daljinu. To je omogućilo iskorištavanje prirodnih izvora energije na najpovoljnijem mjestu, pretvorbom u električni oblik a potom prijenos u tom obliku do mjesta korištenja, koje se više nije moralo slagati s mjestom najpovoljnijeg pridobivanja prirodnih oblika. Budući da električni oblik energije nije prikladan za neposredno korištenje – čak ga nije moguće izravno koristiti, na mjestu toga korištenja ona se mora preobraziti u koristan oblik: svjetlo, toplinu, mehanički ili kemijski oblik.

Sredinom prošlog stoljeća na svjetsku energetsku pozornicu dolazi nuklearna fisijska energija, čije iskorištavanje je toliko napredovalo upravo zahvaljujući posrednoj pretvorbi u električni oblik. Koncem prošlog stoljeća svijet se okreće i nekonvencionalnim obnovljivim izvorima energije, pod prijetnjom nestajanja zaliha konvencionalnih goriva i prijetnjom pretjerana zagrijavanja Zemljine atmosfere korištenjem fosilnim gorivima. Dijelu tih nekonvencionalnih izvora (osobito dijelu onih nestalnih: vjetar, mali vodotoci) također bi bilo neprihvatljivo korištenje bez prethodne pretvorbe u električni oblik.

Naglasimo: izvorno energija je u tvarima – u Zemlji i njezinu bližem okolišu (ugljen, nafta, prirodni plin, nuklearno gorivo, vodne i zračne mase, tvari iz skupa nekonvencionalnih izvora energije), u energetskoj aktivnosti materije Sunca te u gravitacijskom djelovanju masa Zemlje, Sunca i Mjeseca. Da bismo je iskoristili, moramo te tvari steći, prikupiti, pridobiti i dovesti ih energetskim uređajima ili te uređaje izložiti njihovu djelovanju. To je predmet opskrbe energijom, a otkrivanje tih tvari i smišljanje tih uređaja, povijest je energetike.

*Energija* je sposobnost obavljanja rada. Ishodište joj je u materiji. Ne dade se ni iz čega stvoriti niti uništiti. Čovjek je svjestan njezine prisutnosti kada se zbivaju pretvorbe njezina oblika. Tada se nešto mijenja: kreće se, zagrijava ili hladi, svijetli ili zvuči, mijenja položaj, oblik, stanje, sastav... U tim i takvim primjerima, energija prelazi iz jednog prostora u drugi, s jedne materije na drugu, u istom ili promijenjenom svom obliku.

Svi energetski procesi, kojima smišljeno upravlja čovjek ili ih je smišljeno uspostavio, zbivaju se tako da se energija sadržana u nekom izvoru energije, tokom jedne ili više pretvorba (preobrazba, promjena, transformacija, konverzija) njezina oblika, usmjeri nekoj potrebnoj svrsi. Pri tome se dio početne energije pretvori u drugi oblik, usmjeri na drugo mjesto ili se – prirodnim razlozima, ne dade iskoristiti. Iskorištena, pak energija ne nestaje tim iskorištavanjem, ona se u konačnici pretvori u oblik iz kojeg se više ne može, ili ne želi, preobražavati u druge oblike.

# Proizvodnja, potrošnja i gubici energije

Ono što uobičajeno zovemo *proizvodnjom* nekog oblika energije, zapravo je:

– *pridobivanje* nekog prirodnog oblika energije (kažemo: proizvodnja ugljena, na primjer, a svjesni smo kako je to ustvari pridobivanje davno „proizvedenog" ugljena) ili

– *pretvorba* nekog energetskog oblika u drugi (npr. kada energiju sadržanu u gorivu preobražavamo u električnu energiju, koji se proces zbiva u termoelektrani, govorimo o proizvodnji električne energije).

Ono što najčešće zovemo *potrošnjom* energije, zapravo je iskorištenje većeg ili manjeg dijela energije uložene u energetski proces, po obliku–mjestu–svrsi radi kojih je proces i uspostavljen.

Ono što (nespretno izabrano, ali uobičajeno) zovemo *gubicima* energije, dio je uložene energije u energetski proces koji nije iskorišten na poželjan način. Bolje bi bilo govoriti o neiskorištenoj energiji, umjesto o gubicima; energija se ne gubi nego njezin dio nije pretvoren u željeni, koristan oblik, već u neki drugi, neželjeni oblik. Gubici su, dakle, razlika između privedene energije i iskorištene energije u nekom razdoblju – nekog oblika energije ili svih oblika energije, na nekom promatranom prostoru (primjerice: na teritoriju neke zemlje ili području djelovanja nekog energetskog poduzeća).

Omjer između dijela energije koji je nekim energetskim procesom ostvaren kao koristan i ukupne energije uložene u taj proces jest *stupanj djelovanja* tog procesa (stupanj iskorištenja, korisnost, vrsnoća, djelotvornost). Uvjetovan je vrstom energetske preobrazbe (određena se preobrazba može učiniti manje ili više potpuno, ali nikad posve do kraja), vrijednošću energetskih veličina koje su primijenjene i uvjetima pri preobrazbi (ista preobrazba može se izvesti u različitim uvjetima) te kakvoćom uređaja u kojem se ta preobrazba obavlja.

*Prijenos* energije je transport nekog energetskog oblika na potrebnu – ponekad i vrlo veliku – udaljenost, a *distribucija* energije je raspodjela do svakog korisnika. I u tim aktivnostima, opet se dio energije, prirodnim razlozima, gubi. (Ovdje ne pretpostavljamo moguće druge razloge izgubljenoj energiji: nemar, nerazumno rasipanje energije, krađu...)

*Vlastita potrošnja* oblika energije u samom energetskom gospodarstvu (i ono koristi energiju za rasvjetu, za zagrijavanje, klimatiziranje i ventiliranje, za svakovrstan mehanički rad, moguće u kemijske svrhe, za uredska pomagala...) ne predaje se na korištenje kupcima-potrošačima[1], nego se utroši prije te predaje.

*Neposredno potrošena* energija je ona energija koja se iz energetskog gospodarstva predaje na korištenje. Korištenje energijom je konačna pretvorba nekog neposredno iskorištenog oblika energije u *korisnu energiju*, koja se odvija kod kupaca-potrošača. I ta pretvorba, opet se odvija uz neizbježne gubitke energije.

Dodajmo još i to, kako – do kraja precizno gledano – u okviru energetike treba govoriti o neposrednoj *energetskoj* potrošnji oblika energije jer ima i *neenergetske potrošnje*; primjerice: potrošnja ugljena u karbokemiji, nafte u petrokemiji ili prirodnog plina za proizvodnju umjetnih gnojiva. Dakle, dio se prirodnih oblika energije ne iskoristi u energetske, nego u neenergetske svrhe, kao kemijska sirovina. U energetskim bilancama, taj dio posebno se iskazuje i odbija od ukupnih utrošenih količina oblika energije, kako bi se dobila energetska potrošnja.

[1] U knjizi će se najčešće koristiti sintagma *kupac-potrošač*. Naime korisnik energije je kupac te energije (u komercijalnom smislu) a ujedno i njezin potrošač (u energetskom smislu); stoga se takav dvojni naziv činio najprikladnijim. Razlikovati treba potrošača (to je osoba ili pravni subjekt) od trošila (to je uređaj kojim se ostvaruje korištenje energijom).

## Energija po fizičkim oblicima

Poznajemo energiju vezanu uz unutarnju strukturu materije: uz atomske jezgre, atome i molekule. To je unutarnja energija. Bliže nam je poimanje energije vezane uz vanjsko stanje mase u cjelini: uz njezin položaj prema čemu, odnosno uz njezino gibanje u odnosu na što.

Energija koju sadrži materija na razini atomskih jezgara (nukleona) je *nuklearna energija*. Moguće ju je iskoristiti izazivanjem raspada jezgara nekih atoma (npr. atoma uranova izotopa, urana-235); to je energija nuklearnog raspada (*fisije*). Ako bi se iskorištavala pri spajanju jezgara nekih atoma (npr. vodikovih izotopa: deuterija i tricija), bila bi to energija nuklearnog spajanja (*fuzije*).

Energija koju sadrži materija na razini atoma je *kemijska energija*. Može se iskoristiti ako se uspostavi takav kemijski proces pri kojem se oslobađa energija (takav je npr. proces izgaranja, kada se atomi ugljika i vodika iz goriva spajaju s atomima kisika iz zraka). Ima i takvih kemijskih procesa koji se mogu zbiti samo ako se energija dovodi procesu, oni se – dakako – ne mogu koristiti za opskrbu energijom, u takvim se procesima energija troši.

Energija, sadržana u materiji na razini molekula, naziva se *unutarnja toplinska energija*. Mijenja se dovođenjem ili odvođenjem topline. Koristi se tako da se toplina s jednog nositelja odvodi i usmjerava prema drugome. U konačnici, mnogi energetski procesi završavaju upravo tako da se poveća unutarnja toplinska energija okoline.

Tijelo u cjelini, ako je ono u mirovanju u gravitacijskom polju Zemlje, u odnosu na neku nižu razinu od svoje, sadrži *potencijalnu energiju*. Može se iskoristiti omogućavanjem kretanja tog tijela sa svoje na tu nižu razinu. Primjerice: ako vodna masa iz jezera nad morem prostruji kroz turbinu elektrane postavljenu uz razinu mora.

Ako je tijelo u odnosu na svoju okolinu u kretanju, onda u odnosu na tu okolinu tijelo sadrži *kinetičku energiju*. Usporavanjem ili potpunim zaustavljanjem tog tijela može se djelomično ili potpuno iskoristiti kinetička energija nagomilana u njemu. Primjer je pogon vjetroelektrane zračnom masom u strujanju (vjetrom).

Energija može biti nagomilana (akumulirana, prikupljena, u nekom tijelu ili prostoru) ili prijelazna energija. Prijelazni oblici energije pojavljuju se kada nagomilana energija mijenja svoj oblik ili svog nositelja (prelazi s jednog na drugo tijelo ili iz jednog u drugi prostor).

*Nagomilana energija* je: nuklearna energija, kemijska energija, unutarnja toplinska energija, potencijalna i kinetička energija. Može se trajno održati u tom obliku.

*Prijelazna energija* je: mehanička energija, električna energija, toplina i svjetlo. Ne može se zadržati bez promjene u drugi oblik, njezina je pojava kratkotrajna – u trenutku preobrazbe, odnosno iskorištavanja.

## Prirodni oblici energije

*Prirodni* oblici energije (primarni oblici, pojavni oblici, izvori energije) su oni što se pridobivaju iz prirode (zahvaćaju iz prirode, iskorištavaju). Oni se uobičajeno razvrstavaju na više načina:

– prema svom fizičkom obliku (na nositelje nuklearne, kemijske, unutarnje toplinske, potencijalne, kinetičke energije i energiju zračenja);

– prema uobičajenosti svoje primjene (na konvencionalne, uobičajene i nekonvencionalne, nove izvore energije);

– prema svojoj obnovljivosti (na neobnovljive i obnovljive izvore).

U *konvencionalne*, dakle s današnjeg stajališta uobičajene, izvore energije ubrajamo: ogrjevno drvo i sva fosilna goriva (ugljen, sirovu naftu i zemni, prirodni plin), vodne snage (korištene u hidroelektranama snage uobičajeno iznad 10 MW) i nuklearna fisijska goriva.

U *nekonvencionalne* izvore energije ubrajamo one čije je korištenje moguće ali se danas još – ili više – u većoj mjeri ne primjenjuju, kao i one kojima danas još nije tehnološki riješen način njihova ekonomičnog iskorištavanja. To su: energija malih vodotoka (korištene u hidroelektranama snage uobičajeno do 10 MW), biomasa i otpad (biljni i životinjski), bioplin, energija vjetra (eolska energija), energija plime i oseke, te morskih valova, energija Sunčeva zračenja (solarna energija), toplina tla, mora i zraka, unutarnja toplinska energija Zemlje (geotermalna energija) te nuklearna fuzijska goriva.

U primjeni je i naziv *alternativni izvori energije*, izvori koji bi trebali predstavljati alternativu, druge mogućnosti za energetsku opskrbu od onih koje su danas naglašeno primjenjivane. Govori se i o *aditivnim izvorima*, *novim izvorima* ili *eko-izvorima* energije.

Opažamo, dio izvora koje sa stajališta razvijenih društava uvrštavamo u nekonvencionalne izvore energije, u nerazvijenom su svijetu i danas jedini, dakle za njih konvencionalni: sagoriva biomasa, bioplin i otpad (biljni i životinjski). Geotermalnu energiju mogli bismo svrstati u konvencionalne izvore, jer se koristi od davnina, no pravu renesansu svojeg korištenja doživljava tek u novije doba, pa je pripisujemo nekonvencionalnim izvorima. Ogrjevno drvo u srednjem je vijeku bilo jedino gorivo, ali u suvremeno doba korištenje njime na konvencionalni način gotovo je nestalo (ali opet u razvijenom dijelu svijeta); da bi ponovno rasla njegova uporaba, ali na nekonvencionalni način, te ga uvrštavamo – tako korištenog – u biomasu.

Obnovljivost pojedinih izvora energije određujemo uvjetno – u odnosu na ljudsko poimanje vremena. Obnovljivost izvora energije najlakše pojmimo ako kažemo kako je obnovljivi izvor onaj kojeg se dotok svake godine ponavlja, uz stanovita odstupanja. Svi su, naime, izvori energije u konačnici neobnovljivi. Jedino su oni – čija je pojava vezana uz tekuću energetsku aktivnost Sunca (fuzijski nuklearni procesi u njegovoj nutrini), odnosno uz kretanja nebeskih tijela, toliko dugovječni da su s današnjeg ljudskog stajališta praktički neiscrpni.

U *obnovljive* (ili neiscrpne) izvore svrstavamo: neposredno iskorištenje Sunčeva zračenja, vodne snage (neovisno o tome u kako velikim se hidroelektranama iskorištavaju), energiju vjetra i morskih valova, toplinu mora (sve je to posredno, preobraženo, Sunčeva energija) te energiju plime i oseke (uvjetovanu kretanjem Zemlje, Mjeseca i Sunca). Energija biomase može se koristiti na obnovljiv način, tako da ukupni utrošak u pojedinom razdoblju bude jednak ili manji od prirasta biomase u tom razdoblju. Otpad je također obnovljiv, njegov se prosječni godišnji dotok obnavlja, čak – eventualno – povećava. Jednako tako je i s bioplinom, nastaje fermentacijom ekskrementa domaćih životinja te organskih otpadaka iz kućanstava, vrtlarstva, voćarstva, poljoprivrede i industrije. Unutarnja toplinska energija Zemlje – točno govoreći – iscrpiva je, no opet prema ljudskom poimanju vremena trajat će do *sudnjeg dana*, pa je svrstavamo u obnovljive izvore.

Ostali su izvori *neobnovljivi* (iscrpivi), moguće je samo njihovo jednokratno iskorištavanje, to su sva fosilna goriva (ugljen, sirova nafta i prirodni plin) i nuklearna – fisijska i

fuzijska – goriva. Spomenimo kako su fosilna goriva zapravo iz davnina sačuvana energija koju je dozračilo Sunce, fosilizirani biljni i životinjski ostaci iz daleke Zemljine prošlosti. Ogrjevno drvo može se koristiti neobnovljivim načinom, ako se pošumljavanjem ne osigura barem onoliko nove drvne mase koliko se utrošilo iskorištavanjem.

*Tablica 1.1. Prirodni oblici energije prema obnovljivosti i konvencionalnosti primjene*

| Prirodni oblik energije | Obnovljivost | | Konvencionalnost | |
|---|---|---|---|---|
| | Neobnov. | Obnovljiv | Konvenc. | Nekonv. |
| Ugljen | ✓ | | ✓ | |
| Sirova nafta | ✓ | | ✓ | |
| Prirodni plin | ✓ | | ✓ | |
| Nuklearno fisijsko gorivo | ✓ | | ✓ | |
| Vodne snage (*velike* HE) | | ✓ | ✓ | |
| Ogrjevno drvo | | ✓ | ✓ | |
| Vodne snage (*male* HE) | | ✓ | | ✓ |
| Vrući izvori (geotermalna energija) | | ✓ | | ✓ |
| Biomasa i otpad | | ✓ | | ✓ |
| Vjetar | | ✓ | | ✓ |
| Sunčeva energija | | ✓ | | ✓ |
| Toplina tla, vode i zraka | | ✓ | | ✓ |
| Plima i oseka | | ✓ | | ✓ |
| Morski valovi | | ✓ | | ✓ |
| Nuklearno fuzijsko gorivo | ✓ | | | ✓ |

Tablica 1.1. načinjena je s gledišta razvijenih društava, tzv. *nekomercijalna goriva* (sagoriva biomasa – čak i osušen životinjski ekskrement, bioplin, otpad) u zemljama u razvoju su praktički jedini izvori prirodne energije – za njih su to, dakako, konvencionalni izvori.

## Pretvorbeni oblici energije

Do korisnih oblika energije u današnjim energetskim sustavima dolazimo uglavnom preko pretvorbenih (transformiranih) oblika energije, onih koji posreduju između prirodnih i korisnih oblika. Pretvorbeni su oblici: unutarnja toplinska energija, mehanička energija i električna energija. U jedan od tih oblika zahvaćamo prije konačnog iskorištenja energije. Jedino se kemijskom energijom koristimo i bez prethodne preobrazbe oblika (npr. kod korištenja koksom u željezari te korištenja rovnim ugljenom, prirodnim plinom ili nekomercijalnim gorivima kao izvorima topline), doduše i preobrazbom električne energije (kod elektrolize). I toplina vrućih izvora može se koristiti neposredno, jer je zapravo riječ o prirodnom obliku unutarnje toplinske energije.

Pretvorbe se obavljaju stoga što izvorni oblik energije nije pogodan za neposredno korištenje, ili je to čak nemoguće, odnosno što transport energije u svom izvornom obliku nije pogodan, ili je čak nemoguć.

*Unutarnja toplinska energija* uobičajeni je pretvorbeni oblik energije u koji se pretvara kemijska energija sadržana u gorivu, izgaranjem. Plinovi izgaranja nositelji su unutarnje toplinske energije i mogu se neposredno iskoristiti – za zagrijavanje prostora, kuhanje i pripremu tople vode, u tehnološkim procesima, ili posredno – u parnim kotlovima, gdje se unutarnja toplinska energija predaje vodenoj pari te se u tom obliku dalje koristi za pogon parnih turbina ili opet za zagrijavanje prostora i sanitarne vode ili u tehnološkim procesima. Ako se predaje parnoj turbini, pretvara se u njoj najprije u kinetičku energiju i konačno u mehaničku energiju na osovini turbine. U motorima s unutrašnjim izgaranjem ili plinskim turbinama, unutarnja toplinska energija plinova izgaranja izravno se pretvara u mehaničku energiju. U nuklearnim reaktorima zbiva se nuklearna reakcija koja razvija unutarnju toplinsku energiju nositelja topline kojega se usmjerava na proizvodnju vodene pare; reaktor – dakle – preuzima funkciju parnog kotla.

*Mehanička energija* je rezultat pretvorbe unutarnje toplinske energije u parnim i plinskim turbinama te u motorima s unutrašnjim izgaranjem. Mehaničku energiju moguće je ostvariti i vodnim ili zračnim turbinama, izravno iz potencijalne ili kinetičke energije vodnih snaga ili vjetra, energije plime i oseke te morskih valova.

*Električna energija* je nama najzanimljiviji oblik energije a doista je nije lako pojmiti. Da je i električna energija uopće energetski oblik rasudimo po iskustvu o mogućnosti njezine preobrazbe (posredne ili neposredne) iz svih prirodnih oblika energije, te mogućoj preobrazbi u sve korisne oblike energije. Da je riječ o prijelaznom obliku energije rasudimo po tome što se pretvorba u električni oblik zbiva u trenutku njezina korištenja; električni akumulator preobrazi nagomilanu kemijsku energiju u električnu upravo toliko i tada, koliko se i kada ta električna energija preobražava u svjetlo i toplinu žaruljice priključene na taj akumulator. Ako se žaruljica isključi – nema potrošnje, prestaje i pretvorba kemijske u električnu energiju u tom akumulatoru.

Električnim zbivanjima uspostavljaju se električna i magnetska polja, osobita energetski uzbuđena stanja prostora (s materijom li bez materije). U tim se prostorima javljaju sile čiji se rad može koristiti, te se električna energija preobražava u mehaničku. Može se također povećati unutarnja toplinska energija materije, pa se električna energija može iskoristiti kao toplina i svjetlo, žaruljama s užarenom niti. Konačno, može se elektrolizom jedna tvar kemijski preobraziti u drugu i time električna energija pretvoriti u kemijsku.

Električna energija danas se može ostvariti iz svih prirodnih (dijelom izravno a većim dijelom neizravno) i svih drugih pretvorbenih oblika energije. Najčešće, to je danas pretvorba mehaničke energije pomoću generatora, ali moguća je i pretvorba kemijske energije u gorivnim ćelijama, unutarnje toplinske energije termoelementima i magnetohidrodinamskim generatorima, te pretvorba Sunčeva zračenja fotonaponskim ćelijama.

## Oblici neposredne potrošnje energije

U energetskim bilancama (svjetskim, kontinentalnim i nacionalnim) nije moguće iskazivati energiju prema svojim korisnim oblicima. Kada se jednom energija preda na korištenje iz energetskog gospodarstva, znani su samo oblici *neposredne potrošnje energije* (ogrjevno drvo, kruta fosilna goriva, tekuća goriva, plinovita goriva, električna energija, topli-

na, izravno preuzeti nekonvencionalni oblici energije) u kojima je ta energija preuzeta radi korištenja, ali nije znano u koji se korisni oblik (svjetlo, toplina, mehanički rad, kemijska energija) preobrazila kod svakog od nebrojenih kupaca-potrošača[2].

Ipak, kupce-potrošače grupiramo u poznate glavne *sektore potrošnje* i prema tim sektorima iskazujemo neposredno potrošenu energiju: industrija–promet–opća potrošnja. Opću potrošnju najčešće i dalje dijelimo na potrošnju u kućanstvima i na ostalu potrošnju (kamo ubrajamo potrošnju poljoprivrede te javnih i privatnih usluga, komunalnu potrošnju, javnu rasvjetu, građevinarstvo i sl.).

Neposredna potrošnja energije je, dakle, energija koja se predala izravno korištenju, bez daljeg posredovanja unutar energetskog gospodarstva, i naziva se još *finalna potrošnja* energije.

## Korisni oblici energije

Svakodnevni život i rad upućuju nas na spoznavanje korisnih oblika energije: svjetlo, toplinu, mehanički rad i kemijsku energiju.

*Slika 1.1. Dnevna soba – svjetlo kao korisni oblik energije*

*Svjetlo* je energetski oblik kojim se koristimo za osiguranje vidljivosti u vrijeme i na mjestima, kada i gdje nije prisutno prirodno Sunčevo zračenje (slika 1.1). Danas se gotovo isključivo osigurava pretvorbom električne energije. U energetskim računicama, danas je uobičajeno energiji iskorištenoj u obliku svjetla pridodati i energiju iskorištenu za bavljenje

2 Sveukupna neposredna energija koju preuzima prosječno kućanstvo u Njemačkoj (u sadašnje doba) koristi se za: zagrijavanje (51 posto), pogon automobila (34 posto), pripremu tople vode za sanitarne potrebe i kuhanje (osam posto), mehanički rad (primjerice za pogon kompresora u frižideru, četiri posto), procesnu toplinu (za grijanje vode u strojevima za pranje rublja ili posuđa, dva posto) te za rasvjetu i ostalo ( jedan posto).

informacijama (telefon, telegraf, radio, televizija, audio-vizualni uređaji, računala), jer se ta energija ostvaruje isključivo preobrazbom električne energije i jer je riječ o relativno manjem dijelu ukupno iskorištene energije.

*Toplinom* se koristimo kako bismo prostore za život i rad učinili primjerenijim čovjeku u hladnim klimatskim razdobljima, da pripremamo jelo i obavljamo higijenske potrebe te u brojnim tehnološkim procesima (npr. pri kovanju, lijevanju, kaljenju, sušenju, pečenju, kemijskim i biološkim procesima koji se odvijaju uz dovođenje topline itd.). Slika 1.2.

*Slika 1.2. Električna indukcijska peć – toplina kao korisni oblik energije*

*Mehanički rad* vjerojatno najlakše i najtočnije poimamo. To stoga što za njegovo korištenje znamo u primjerima gdje se može koristiti i neposredan rad ljudskih mišića: za premještanje, podizanje-spuštanje tereta (slika 1.3), transportiranje na neku udaljenost, obradu materijala skidanjem strugotine, savijanjem, kovanjem, presanjem itd. Mehanički se rad koristi i za ventiliranje, tlačenje nekog plina, crpljenje kakve tekućine, mljevenje i drobljenje kakva materijala, valjanje i sabijanje, pri obradi tla i brojnim drugim znanim primjerima u kućanstvu, industriji, obrtu i građevinarstvu, poljoprivredi, prometu...

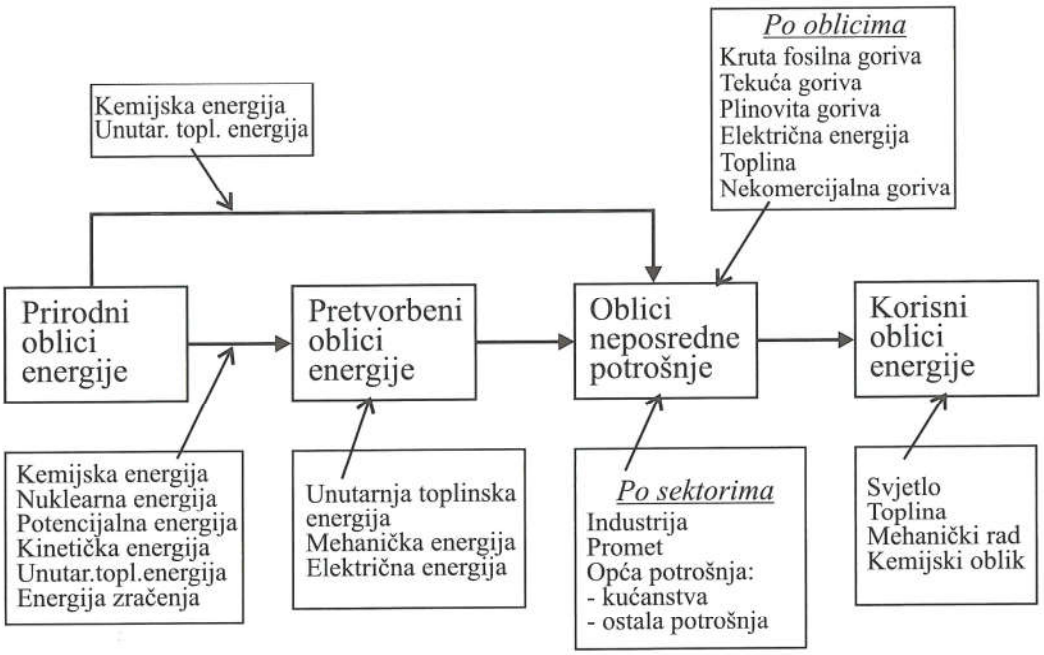
*Kemijskom energijom* koristimo se npr. u visokim pećima za proizvodnju sirovog željeza, elektrolučnim pećima za proizvodnju ferolegura i karbida, elektrolitičkim kadama za proizvodnju aluminija (slika 1.4) i sl. U svim tim primjerima uložena energija iskorištena je za formiranje kemijski nove korisne tvari iz prethodno pridobivene drugačije tvari. U kemijsku

*Slika 1.3. Kranska dizalica – mehanički rad kao korisni oblik energije*

*Slika 1.4. Kada za elektrolizu aluminija – kemijski, kao korisni oblik energije*

energiju pretvaramo električnu energiju, kada punimo akumulator, primjerice kada punimo bateriju u našim mobitelima.

Na slici 1.5. prikazan je tijek korištenja energijom, od pridobivanja prirodnih oblika energije, preko pretvorbenih oblika do korištenja neposrednim, odnosno korisnim oblicima energije.




*Slika 1.5. Prirodni, pretvorbeni, oblici neposredne potrošnje i korisni oblici energije*

## Opaske uz bilance električne energije

U nacionalnim, kontinentalnim i svjetskim godišnjim elektroenergetskim bilancama uvriježilo se osobito, svojstveno imenovanje pojmova, kada je riječ o prirodnim oblicima energije, pretvorbenoj ili neposredno korištenoj električnoj energiji.

Ponajprije, javljaju se prirodni ili pretvorbeni oblici energije koji su *iskorišteni za pretvorbu u električni oblik energije*. To je ukupna energija svih energetskih oblika, koja se privodi elektranama radi proizvodnje električne energije. U ukupnoj dobavi svih oblika energije za pretvorbu u električnu energiju razlikujemo fosilna goriva za termoelektrane, vodne snage za hidroelektrane, nuklearno gorivo za nuklearne elektrane te prirodne oblike energije za elektrane na nekonvencionalne oblike energije. Energetske statistike raznih zemalja pri tome postupaju različito.

Energetska statistika, kakva je uobičajena u Europskoj Uniji i Međunarodnoj agenciji za energiju (IEA), obuhvaća ulazne oblike energije za korištenje u elektranama na sljedeći način:

– za konvencionalna goriva iskorištena u termoelektranama putem količina tih goriva (te su količine mjerljive) i jediničnih energetskih sadržaja tih goriva,

– za vodne snage iskorištene u hidroelektranama primjenjuje se faktor konverzije 3,6 PJ/TWh, dakle, uzima se kao da se izlazna električna energija iskazana primjerice teravatsatima ostvarila pretvorbom vodnih snaga iskazana primjerice petadžulima, bez gubitaka (jer bi prirodno iskorištenu energiju vodnih snaga bilo nemoguće izmjeriti),

– za nuklearna goriva iskorištena u nuklearnim elektranama određuje se njihov energetski sadržaj uz pretpostavku da nuklearne elektrane neprekidno rade uz stupanj djelovanja jednak prosječnom stupnju djelovanja konvencionalnih termoelektrana; uobičajeno se uzima da je to 33 posto,

– za nekonvencionalne izvore energije: (a) uzima se faktor konverzije 3,6 PJ/TWh, dakle opet kao da rade bez gubitaka jer bi prirodnu energiju dozračenu od Sunca, preoblikovanu iz vjetra ili u malim HE bilo nemoguće izmjeriti, (b) za geotermalne elektrane, uzima se kao da je stupanj njihova djelovanja 10 posto i (c) za elektrane na nekomercijalna goriva, uzima se opet količina tih goriva i jedinični energetski sadržaj tih goriva.

U hrvatskoj elektroenergetskoj bilanci, koju izdaje Energetski institut *Hrvoje Požar*, kao ulazna energija vode za pogon hidroelektrana, uzima se ona energija koja proizlazi iz proizvedene električne energije u hidroelektranama uz prosječni stupanj djelovanja kakav se ostvaruje u hrvatskim termoelektranama (oko 10 PJ/TWh). Time je ta bilanca, u brojčanom iskazu ukupne potrošnje prirodnih oblika energije, neosjetljiva na vrlo velike varijacije godišnje proizvodnje u hidroelektranama (godišnja proizvodnja u sadašnjim hrvatskim hidroelektranama varira između 3,5 i 7 TWh), jer razliku izostale proizvodnje hidroelektrana u sušnoj godini nadoknađuje pojačan angažman termoelektrana u takvoj godini.

Kao ulazna energija u termoelektrane-toplane uzima se, dakako, ukupna energija goriva koje je iskorišteno za proizvodnju električne i toplinske energije i ta se energija ne može dijeliti na onu koja je iskorištena za proizvodnju električne energije i na onu koja je iskorištena za proizvodnju toplinske energije. Na izlazu iz termoelektrana-toplana, naravno, mjere se i iskazuju te energije odjelito: električni i toplinski dio proizvodnje. Električni dio te proizvodnje nastavlja svoj tok u bilanci ukupno proizvedene električne energije, a toplinski dio u bilanci toplinske energije.

Brutoproizvodnja električne energije je proizvodnja ostvarena na priključnicama generatora svih elektrana. To je, dakle, energija iskorištena za pretvorbu u električnu energiju, umanjena za gubitke pri toj pretvorbi.

Netoproizvodnja električne energije je brutoproizvodnja umanjena za vlastitu potrošnju električne energije u elektranama.

Vlastita potrošnja električne energije u elektranama sastoji se od pokrivanja potreba za električnom energijom brojnih pomoćnih pogona koji omogućuju normalno funkcioniranje tih elektrana: crpaka, kompresora, ventilatora i sl. Pri tome, vlastita potrošnja u termoelektranama znatno je veća nego u hidroelektranama. Također, u vlastitu potrošnju ubrajamo električnu energiju potrebnu za rasvjetu, za zagrijavanje, hlađenje i ventiliranje, za uredske strojeve i ostalu radnu mehanizaciju, za mehanički rad različitih strojeva u radionicama, za vodoopskrbu i sl.

Ako je riječ o nacionalnoj elektroenergetskoj bilanci (ili bilanci kakva još užeg područja) onda se netoproizvodnji električne energije dodaje i saldo uvoza i izvoza električne energije, jer će i ta električna energija biti predana na korištenje, ali izravno bez pretvorbe, jer je preuzeta u električnom obliku. Time dolazimo do ukupne električne energije raspoložive za korištenje.

Brutopotrošnja električne energije je netopotrošnja (neposredna potrošnja) električne energije uvećana za gubitke u prijenosnoj i distribucijskoj mreži, te za vlastitu potrošnju u elektroprivredi (izuzev vlastite potrošnje u elektranama).

Razlikujemo vlastitu potrošnju električne energije u elektranama te u ostaloj elektroprivredi (dakle prijenosnoj i distribucijskoj mreži – opet za pogon pomoćnih postrojenja u električnim rasklopnim postrojenjima, te za rasvjetu, zagrijavanje, hlađenje i ventiliranje, uredske strojeve i ostalu radnu mehanizaciju, za mehanički rad različitih strojeva u radionicama, za vodoopskrbu i sl.) i vlastitu potrošnju električne energije u cjelokupnom energetskom gospodarstvu. Naime, i ostalo energetsko gospodarstvo (proizvodnja i prerada ugljena, nafte i plina, proizvodnja svih pretvorbenih neelektričnih oblika energije) rabi električnu energiju za pogon svojih postrojenja koja se ne upućuje krajnjim kupcima-potrošačima električne energije. Može se smatrati kako je ta energija sa stajališta elektroprivrede predana kupcima – neelektroprivrednim energetskim subjektima. Ipak, primjerice, hrvatska elektroenergetska bilanca uzima i tu električnu energiju kao onu koja *nije* predana kupcima-potrošačima.

Ako u promatranoj zemlji ima crpno-akumulacijskih hidroelektrana (CAHE), uz brutopotrošnju dodaje se i potrošnja električne energije za crpljenje vode u tim elektranama (crpni rad tih elektrana), a energija proizvedena u turbinskom radu tih elektrana pribraja se dakako brutoproizvodnji.

Dakle, vrijede relacije, slika 1.6:

Netoproizvodnja električne energije =

= Brutoproizvodnja – Vlastita potrošnja elektrana

Raspoloživa električna energija na razini prijenosne mreže =

= Netoproizvodnja + Uvoz – Izvoz

S druge strane je:

Raspoloživa električna energija na razini prijenosne mreže =

= Brutopotrošnja + Energija za crpljenje u CAHE

Brutopotrošnja električne energije =

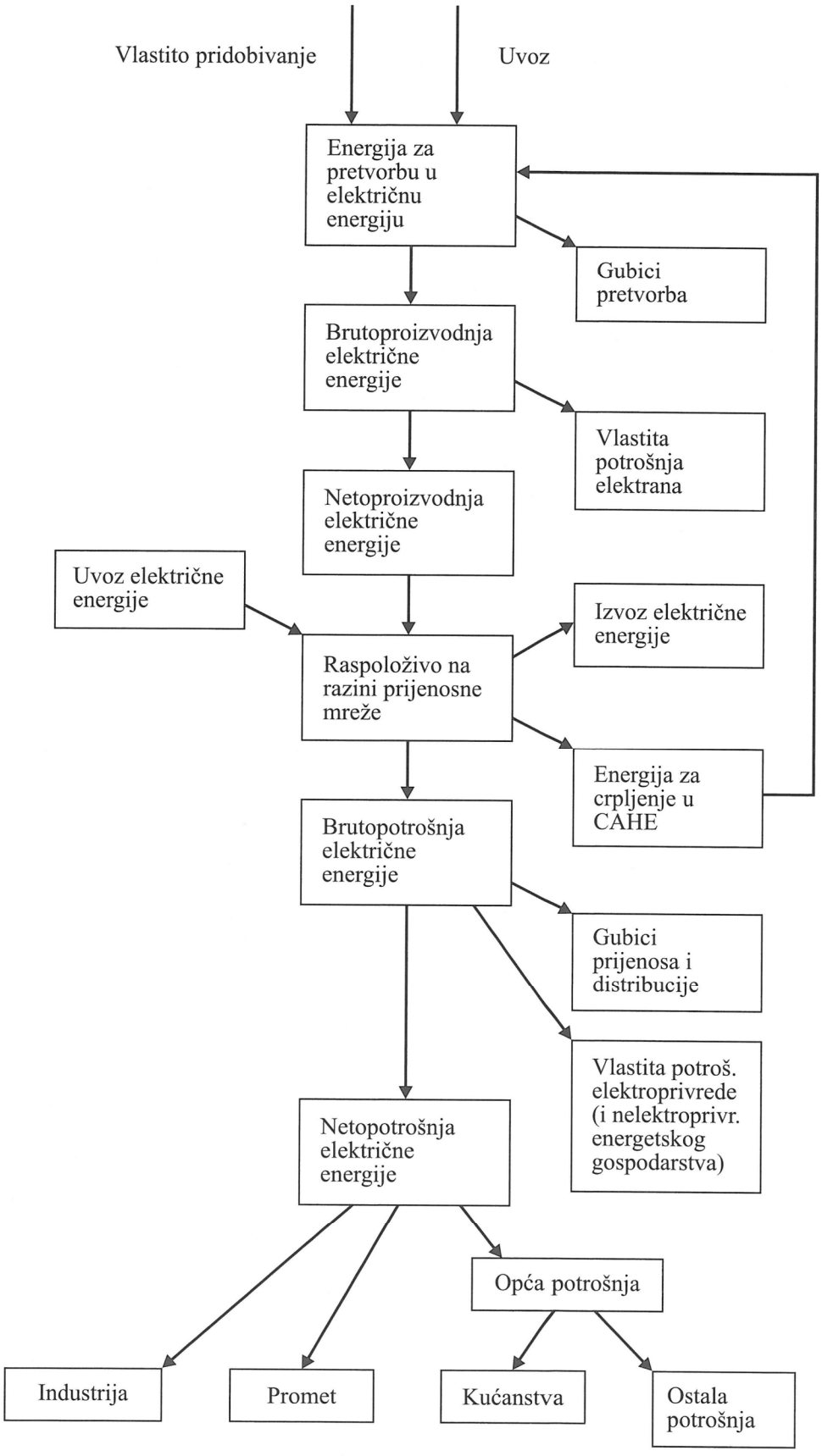
= Netopotrošnja (neposredna potrošnja) +

+ Gubici u prijenosu i distribuciji +

+ Vlastita potrošnja elektroprivrede (izuzev vlastite potrošnje elektrana) +

+ Vlastita potrošnja neelektroprivrednog energetskog gospodarstva (eventualno).

Netopotrošnja električne energije je ono što smo općenito nazvali neposredna potrošnja, dakle ona energija koja se predaje kupcima-potrošačima na korištenje.




*Slika 1.6. Tok energije u elektroenergetskoj bilanci*

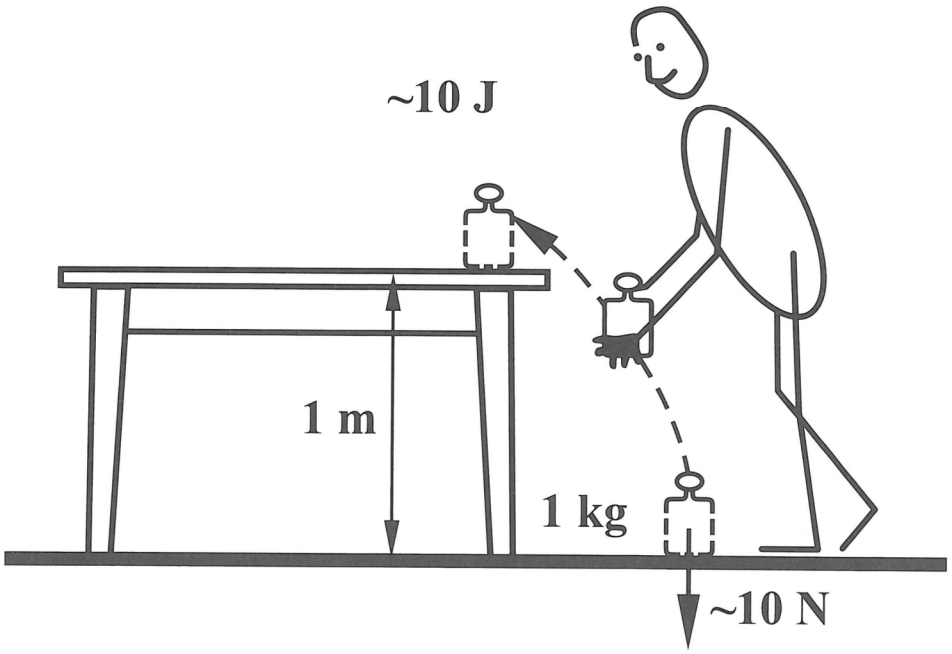
# 2

# Iskazivanje vrijednosti (elektro)energetskih veličina

Kako bismo omogućili jednoznačno sporazumijevanje o vrijednostima (elektro)energetskih veličina, moramo se uputiti u najčešće korištene, zapravo propisane, jedinice za mjerenje tih veličina[3]. Uz najnužnije opaske o naravi pojedine veličine.

## Od džula do petadžula

Dobro možemo pojmiti masu od 1 kilograma. Zemljino gravitacijsko polje privlači toliku masu silom od okruglo 10 njutna (točno iskazano: 9,81 njutn). Kada tu silu ravnomjerno svladavamo, podignuvši tu masu na visinu od 1 metara, obavimo rad od okruglo 10 džula (točno, dakako 9,81 džul). (Slika 2.1) Džul je, dakle, jedinica za mjerenje rada ili energije[4].




*Slika 2.1. Primjer rada od približno* 10 *džula*

[3] Vrijednost neke veličine je iznos (iskazan brojem) mjernih jedinica koje služe za mjerenje te veličine. Vrijednost veličine iskazuje se umnoškom tog broja i mjerne jedinice (napisane punom riječju ili propisanom kraticom). Primjerice, ako je *veličina* napon, a u nekom slučaju *vrijednost napona* 230 *volta,* onda je *iznos* 230 a *mjerna jedinica* volt. Možemo pisati mjernu jedinicu i kraticom, dakle 230 V.

[4] Nazivi *rad* i *energija* su sinonimi. Naziv *rad* koristimo ako je riječ o obavljenom, ostvarenom djelovanju, a naziv *energija* češće primjenjujemo kada je riječ o namjeravanom, predviđenom, potencijalnom djelovanju, mogućnošću djelovanja. No to nije strogo određeno – za *električnu energiju* u oba se slučaja govori o energiji, iskorištenoj ili tek moguće korištenoj. Manje uobičajeno je reći: *električni rad*, premda bi to bilo apsolutno dopušteno!

Jednako smo mogli kazati i 10 njutnmetara, odnosno 10 vatsekunda, dakle jedan džul je jednak jednom njutnmetru ili jednoj vatsekundi. U pisanju, ravnopravno je korištenje punog naziva mjerne jedinice ili primjena njezina znaka. Propisani znak za džul je J (napisan uvijek okomitim pismom, kao što uvijek pišemo i znakove *svih* drugih mjernih jedinica). Dakle, za rad od 10 džula, možemo pisati 10 J (i brojeve, ako znače iznos vrijednosti kakve veličine, pišemo *uvijek* okomitim pismom).

Jednako velik rad bio bi obavljen da smo masu od 2 kg (čija je težina oko 20 N) podigli na visinu od pola metra ili uteg mase pola kilograma podigli na visinu od dva metra. Itd.

Taj rad neovisan je o trajanju tog zahvata. Traje li to kraće ili dulje vrijeme, obavljeni rad je – u tom primjeru – zaokruženo, 10 džula. (Zanemarujemo ovdje rad koji se uloži pri ubrzavanju i usporavanju mase!)

Izvedemo li to sto puta, rad kojeg ukupno obavimo je 1 000 džula. Tada možemo reći i 1 kilodžul. Za uvećavanje osnovne jedinice, koristimo se tisuću, milijun, milijardu... puta većim jedinicama, izražavajući to odgovarajućim a propisanim predmetkom pred osnovnom jedinicom:

1 kilodžul (kJ) = tisuću džula ($10^3$ J)

1 megadžul (MJ) = milijun džula ($10^6$ J)

1 gigadžul (GJ) = milijarda džula ($10^9$ J)

1 teradžul (TJ) = bilijun džula ($10^{12}$ J)

1 petadžul (PJ) = milijun milijarda džula ($10^{15}$ J)

Jednako je, dakle, reći 100 džula i 0,1 kilodžul, kao što je isto tisuću kilodžula i jedan megadžul itd. Takve propisane predmetke primjenjujemo i za uvećavanje drugih jedinica za mjerenje veličina (npr. kilometar, tisuću metara ili kilogram, tisuća grama), tablica 2.1. Zapažamo da se znak za uvećanje jedinica piše malim slovom „k“ za *kilo*, a velikim slovima „M“, „G“, „T“ i „P“ za *mega*, *giga*, *tera* i *peta*. Malo slovo „m“ napisano pred znakom jedinice znači *mili*, umanjenje tisuću puta, primjerice mm, milimetar. Propisani predmetci za umanjenje jedinica prikazani su tablicom 2.2.

*Tablica 2.1. Propisani predmetci za uvećanje jedinica i njihovi propisani znakovi*

| Vrijednost predmetka | | Naziv predmetka | Znak |
|---|---|---|---|
| Iskazana brojem | Riječju | | |
| 10 | deset | deka | da |
| 100 | sto | hekto | h |
| 1000 | tisuća | kilo | k |
| 1000 000 | milijun | mega | M |
| 1000 000 000 | milijarda | giga | G |
| 1000 000 000 000 | bilijun | tera | T |
| 1000 000 000 000 000 | bilijarda | peta | P |
| 1000 000 000 000 000 000 | trilijun | eksa | E |
| 1000 000 000 000 000 000 000 | | zeta | Z |
| 1000 000 000 000 000 000 000 000 | | jota | Y |

*Tablica 2.2. Propisani predmetci za umanjivanje jedinica i njihovi propisani znakovi*

| Vrijednost predmetka | | Naziv predmetka | Znak |
|---|---|---|---|
| Iskazana brojem | Riječju | | |
| 0,1 | desetinka | deci | d |
| 0,01 | stotinka | centi | c |
| 0,001 | tisućinka | mili | m |
| 0,000 001 | milijuntinka | mikro | μ |
| 0,000 000 001 | milijarditi dio | nano | n |
| 0,000 000 000 001 | bilijunti dio | piko | p |
| 0,000 000 000 000 001 | bilijarditi dio | femto | f |
| 0,000 000 000 000 000 001 | trilijunti dio | ato | a |
| 0, 000 000 000 000 000 000 001 | | zepto | z |
| 0, 000 000 000 000 000 000 000 001 | | jokto | y |

## Koliki je 1 kilovatsat?

Kilovatsat je također uobičajena i korištena jedinica za izražavanje energije ili rada, osobito u elektroenergetici. Ona je znatno veća od džula; kako je 1 kilovat jednak tisuću vata a 1 sat ima 3 600 sekunda, to je jedan kilovatsat 1 000 × 3 600 vatsekunda ili:

1 kilovatsat je 3,6 megadžula.

Rad od 1 kilovatsata bio bi primjerice obavljen kada bi se uteg iz ranijeg primjera (dizanje utega mase 1 kilograma na visinu 1 metar) podigao na stol u 360 000 navrata (!), jer je 360 000 × 10 J = 3 600 000 J = 3,6 MJ. To je vrlo veliki rad za ljudsko poimanje, toliki rad obavili bismo, dobro se naradivši, tijekom uzastopnih nekoliko dana, možda tjedan ne bi bio dovoljan. Izlazi kako čovjeku nije lako obaviti rad od 1 kWh. Mora naporno i dugotrajno raditi kako bi to postigao!

Ako ovdje primjenjujemo veće jedinice, onda nas najčešće zanima njihov odnos prema kilovatsatu (a ne prema vatsatu), dakle:

1 megavatsat (MWh) = tisuću kWh ($10^3$ kWh)

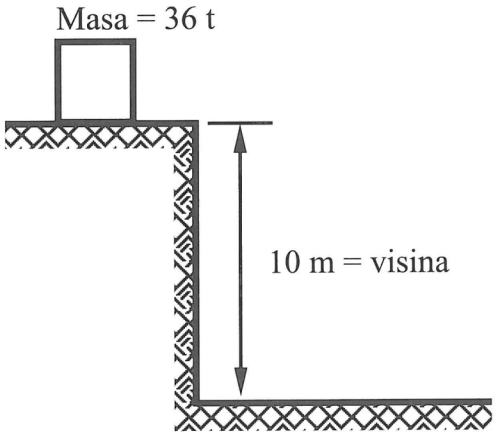
1 gigavatsat (GWh) = milijun kWh ($10^6$ kWh)

1 teravatsat (TWh) = milijarda kWh ($10^9$ kWh).

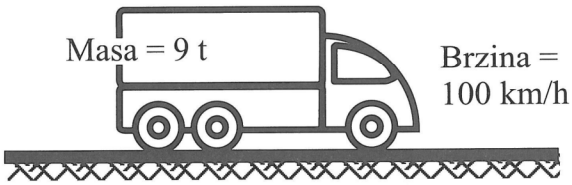
## Još nekoliko primjera energije od 1 kilovatsat

S još nekoliko bliskih primjera spoznajmo veličinu energije od 1 kilovatsat (slika 2.2). Vjerojatno je najbliži primjer žarulje s užarenom niti od 100 W za čije se korištenje u trajanju od 10 sati uloži upravo 1 kWh električne energije. Pokažimo kako je – pri tome – vrlo mali dio električne energije preobražen u svjetlo (samo oko pet posto); preostatak je preobražen u zračenje nevidljivog spektra i toplinu.

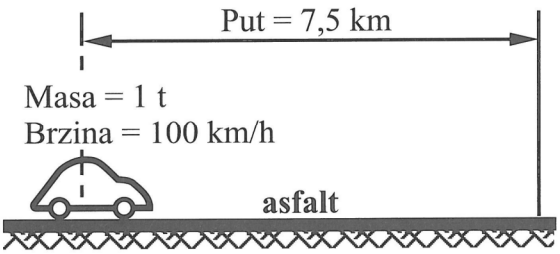
Toplina u koju se električna energija pretvara u električnom grijaču bojlera, volumena 80 litara, ispunjenog vodom, ako se temperatura vode povisi za oko 11 °C, upravo je veličine



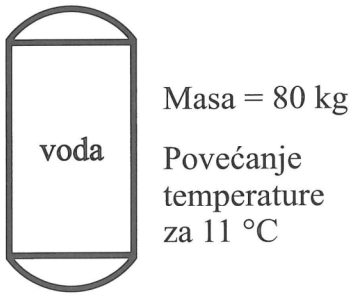

***Potencijalna energija***



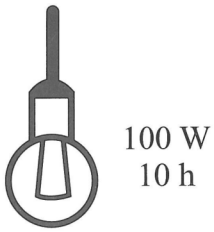

***Kinetička energija***




***Mehanički rad***

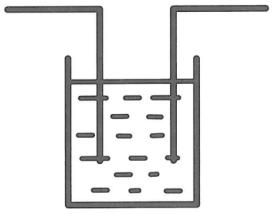



***Toplinska energija***




U tome: ~ 5%
vidljivo zračenje

***Rasvjeta***



6,7 dag Al

***Kemijska energija***

*Slika 2.2. Primjeri energije od* 1 *kilovatsata* (3,6 MJ)

1 kWh. Dakle, okruglo govoreći, za svakih desetak Celzijevih stupnjeva povećanja temperature (samo u području do ključanja) treba u tolikom bojleru uložiti po 1 kilovatsat energije. Ako bismo željeli vodu s temperature 15 °C zagrijati na temperaturu 37 °C, trebali bismo uložiti 2 kWh električne energije, zapravo i nešto više jer bojler nije idealno toplinski izoliran i dio se topline odvodi i isijava, a ne kumulira u vodi bojlera.

Za primjer mehaničkog rada uzmimo osobni automobil skromnije veličine, čija ukupna masa (zajedno s teretom) iznosi oko 1 tone. Pri njegovu ravnomjernom kretanju treba svladavati otpor trenja kotrljanja po podlozi (pretpostavimo asfalt) i otpor zraka (pretpostavimo pri brzini od 100 km/h). Prevaljivanjem puta duljine oko 7,5 km, obavio bi se mehanički rad od 1 kWh. Kemijska energija goriva, koje bi se pri tome utrošilo, znatno je veća, jer dio energije goriva neće biti preobražen u mehanički rad (već u toplinu) i dio će se energije utrošiti u motoru i mehanizmu, za svladavanje tamošnjih otpora. Ako bi automobil bio vrlo učinkovit, trošio bi po prilici pet litara goriva na 100 kilometara. To bi značilo otprilike 200 MJ ili oko 55 kWh, a na 100 kilometara ostvario bi se mehanički rad od oko 13 kWh, dakle stupanj djelovanja tog automobila je otprilike 24 posto (ili zaokruženo: jedna četvrtina).

Konačno: elektrokemijski primjer. U elektrolitičkoj kadi za elektrolizu aluminija, energijom od 1 kilovatsata izlučilo bi se 6,7 dekagrama aluminija iz aluminijeva oksida, dakle za proizvodnju 1 kilograma aluminija treba uložiti oko 15 kilovatsati električne energije. Uložena električna energija iskorištena je za pretvorbu jednog kemijskog oblika (aluminijev oksid) u drugi (aluminij).

Dodajmo da masa od 36 tona (npr. vode u nekom bazenu), na visini od 10 metara ima potencijalnu energiju od 1 kWh, u odnosu na razinu od koje smo odmjerili tih 10 metara u okomitom smjeru. Ako se iskoristi u hidroelektrani, koja se nalazi na donjoj razini, dobit će se nešto manje od jednog kilovatsata, opet zbog neizbježnih gubitaka energije.

Isto toliku kinetičku energiju (1 kWh) ima jureći kamion ukupne mase od oko 9 tona, ako se kreće brzinom od oko 100 km/h. Ako bi se, na nesreću, zaustavio udarom u nepomičnu prepreku, oslobodila bi se toliko velika energija za razaranje kamiona i zida. Dakle, kao da se 36 tona vode u hipu sručilo s 10 metara visine...

## Što je kilovat?

Bili smo rekli kako brzine, kojima je stanoviti isti rad obavljen, ne utječu na izražavanje njegove brojčane vrijednosti. Ako smo onaj uteg iz početnog primjera podigli za jednu sekundu, dvije sekunde ili čak 10 sekunda, u sva tri slučaja smo obavili jednak rad – od 10 džula.

Ipak, slažemo se da je taj rad efektnije obavljen ako je to trajalo jednu sekundu, nego ako je to trajalo 10 sekunda. U prvom slučaju je isti rad obavljen 10 puta brže no u drugom.

Brzina obavljanja rada je *snaga* (efekt, učin).

Izračunava se tako da se vrijednost rada koji se obavi, podijeli s vremenom tijekom kojeg je to urađeno:

10 J : 1 s = 10 W
10 J : 2 s = 5 W
10 J : 10 s = 1 W.

Dakle je snaga

$$P = E / T \tag{2.1}$$

gdje je $P$ snaga, $E$ energija, a $T$ trajanje djelovanja iste snage.

Energija (rad) pri tome, treba biti izražena u džulima, vrijeme u sekundama te će rezultat biti izražen u vatima. Vat je, dakle, jedinica za mjerenje snage.

Ako je pak energija (rad) izražena u kilovatsatima onda treba vrijeme iskazati u satima, te će rezultat računanja biti u kilovatima.

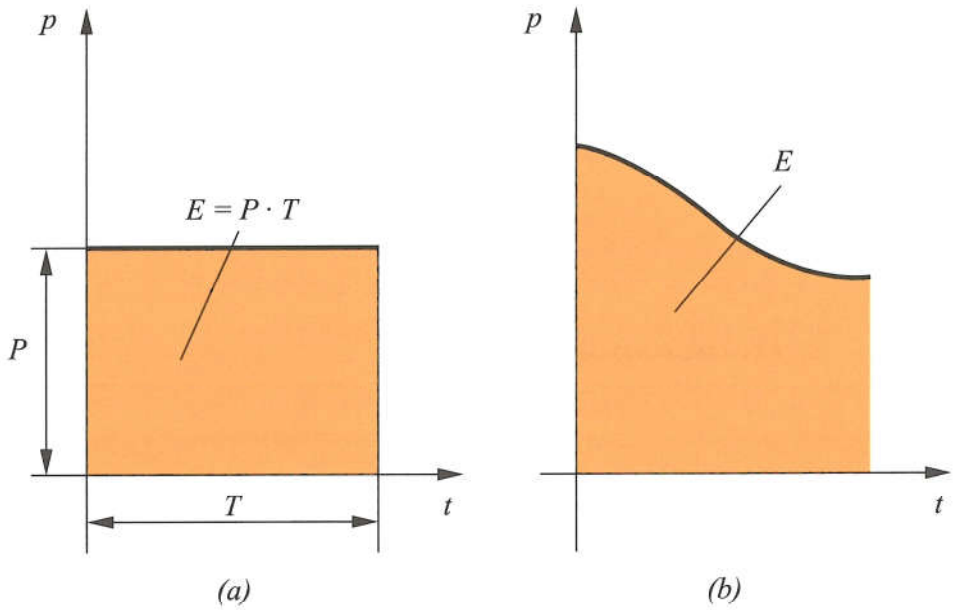
Zaključujemo da uređaj snage 10 W obavi tijekom jedne sekunde isti rad kao uređaj snage 5 W tijekom dvije sekunde ili uređaj snage 1 W za deset sekunda. Što snažniji uređaj – to je za neki rad potrebno manje vremena. No, i dugotrajnim radom uređaja male snage može se ostvariti velik rad.

Za određivanje energije koja se pri tome iskoristi od nekog izvora, treba snagu pomnožiti s trajanjem toga korištenja, u odgovarajućim jedinicama. Npr. ako je neki uređaj snage 0,15 kW radio 10 sati, tada je iskorištena energija tim uređajem (ili rad obavljen tim uređajem; ravnopravno je reći *rad* ako je ostvaren i *energija* koja je pri tome utrošena) 0,15 kW puta 10 sati, dakle 1,5 kilovatsat.

Dakle, želimo li odrediti energiju iz snage $P$ i trajanja njezina djelovanja $T$, tada je

$$E = P \cdot T \tag{2.2}$$

To nam omogućuje jednostavnu grafičku predodžbu u dijagramu snaga-vrijeme; kako je ploština umnožak dvije dužine, to je u tom dijagramu energija jednaka ploštini do apscise pod linijom koja prikazuje snagu u određenom trajanju (slika 2.3). Takva grafička predodžba




*Slika 2.3. Grafička predodžba energije u dijagramu snaga-vrijeme*
*(a) uz stalnu snagu, (b) uz promjenjivu snagu*

korisna je u energetskim razmatranjima, pa i ako se snaga s vremenom mijenja – opet će energija biti ploština pod krivuljom snage.

Za iskazivanje velikih snaga, opet se koriste veće jedinice:

1 kilovat (kW) = tisuću vata

1 megavat (MW) = tisuću kilovata

1 gigavat (GW) = tisuću megavata.

## Još neke energetske jedinice

Povijest tehnike i različitosti dijelova svijeta u kojima se ona ranije nepovezano razvijala, donijeli su i neke energetske jedinice koje ovdje nismo još spomenuli, ali susrećemo se u literaturi, tisku i govoru. Spomenimo samo najčešće.

Najprije, tu je kilokalorija. Količina topline, koju treba dovesti masi od jednog kilograma vode kako bi joj se temperatura povećala za 1 °C, upravo je 1 kilokalorija (kcal). Veza s danas korištenom jedinicom je (približno):

1 kWh = 860 kcal.

U energetskim raspravama česta je jedinica za izražavanje energije i tona ekvivalentnog ugljena. To je vrijednost energije koju bi sadržavala masa od 1 tone ugljena kojeg bi svaki kilogram sadržavao kemijsku energiju od 7 000 kcal. Dakle je:

1 tona ekvivalentnog ugljena[5] = 8,14 MWh.

Danas je češće u primjeni jedinica za izražavanje energije tona ekvivalentne nafte. To je vrijednost energije koju bi sadržavala masa od 1 tone nafte koje bi svaki kilogram sadržavao kemijsku energiju od 10 000 kcal. Stoga je:

1 tona ekvivalentne nafte[6] = 11,63 MWh

Uvođenje tih mjernih jedinica uvjetovano je željom da se energetske jedinice nekako približe običnom svijetu. Jedinicu tona ekvivalentnog ugljena svatko je znao zamisliti i lako je shvaćao umnogostručivanje. Danas svjetske i europske energetske statistike primjenjuju kao jedinicu energije tonu (odnosno kilotonu, tisuću tona, ili megatonu, milijun tona) ekvivalentne nafte, jer je nafta danas znatno prisutnija od ugljena, pa je najlakše širokom krugu ljudi pojmiti tonu nafte.

Premda se ne radi o energetskoj veličini, prilika je da se kaže o volumnoj jedinici koja se koristi u svjetskom naftnom gospodarstvu vrlo često: barel. Volumen od okruglo 159 litara (odnosno kubnih decimetara) je jedan barel. Uz specifičnu masu sirove nafte od oko 0,86 kg/dm$^3$, izlazi da je približno: 1 barel = 137 kilograma sirove nafte. Odnosno 1 tona sirove nafte je 7,3 barela.

Energetski ekvivalenti, kojima se koristimo kod preračunavanja vrijednosti energetskih veličina iskazane jednom polaznom jedinicom u ekvivalentnu vrijednost iskazanu drugom jedinicom, navedeni su u tablici 2.3.

---

[5] tec (tonne equivalent of coal, engl.), tSKE (Tonne Steikohleeinheit, njem.)

[6] toe (tonne of oil equivalent, engl.), tRÖE (Tonne Rohöleinheit, njem)

*Tablica 2.3. Neki energetski ekvivalenti*

| Polazna jedinica | PJ | TWh | Mt ekv. nafte | Mt ekv. ugljena |
|---|---|---|---|---|
| 1 PJ | 1 | 0,2778 | 0,02388 | 0,03412 |
| 1 TWh | 3,6 | 1 | 0,086 | 0,123 |
| 1 Mt ekv. nafte = 1 Mtoe = 1 MtRÖE | 41,87 | 11,63 | 1 | 1,43 |
| 1 Mt ekv. ugljena = 1 Mtec = 1 MtSKE | 29,31 | 8,14 | 0,7 | 1 |

Tu su:
1 PJ = 1 petadžul = $10^{15}$ džula
1 TWh = 1 teravatsat = $10^9$ kilovatsati
1 Mt ekv. nafte = 1 milijun tona ekvivalentne nafte = $10^6$ tona ekv. nafte
1 Mt ekv. ugljena = 1 milijun tona ekvivalentnog ugljena = $10^6$ tona ekv. ugljena

Spomenimo još i jedinicu za iskazivanje stupnja zagrijanosti kakve mase, njezine temperature. Ako tijelo ne sadrži ništa unutarnje toplinske energije, apsolutna temperatura mu je 0 kelvina (K). Radi li se o vodi, ona iz leda prelazi u tekuće stanje pri apsolutnoj temperaturi 273,15 K. Prelazi li voda u paru, to se zbiva – pri normalnom atmosferskom tlaku – na apsolutnoj temperaturi 373,15 K. Bliže nam je poimanje temperature iskazane Celzijevim stupnjevima, kod kojeg se uzima da je ledište vode na temperaturi 0 °C a vrelište na +100 °C. Dakle razlika temperature od 1 °C istovjetna je razlici temperature od 1 kelvin. Niže apsolutne temperature od 273,15 K imaju Celzijevu temperaturu iskazanu negativnim predznakom, a apsolutna nula iskazana Celzijevim stupnjevima ima vrijednost –273,15 °C. Preračun temperature $\theta$ iskazane Celzijevim stupnjevima (uključujući predznak!) u apsolutnu temperaturu $T$ iskazanu kelvinima i obrnuto, je

$T$ (K) = $\theta$ (°C) + 273,15
$\theta$ (°C) = $T$ (K) – 273,15.

## Iskazi postocima

Postotak dakako nije fizikalna veličina, nego uobičajeni način da se iskaže omjer nečega prema čemu. Ako se izriče ili piše, *mora biti znano što je* 100 posto, a to treba reći ili napisati. (To je vrijednost koja stoji u nazivniku postotnoga omjera!) Nije jasno rečeno kažemo li napon smije biti za 10 posto veći. Potpuno je jasno ako kažemo da napon smije biti za 10 posto veći od nazivnog napona.

Jednako je reći struja je 75 posto dopuštene i da je struja za 25 posto manja od dopuštene struje. Ili ako je struja za 15 posto premašila nazivnu struju, jednako je reći struja je 115 posto nazivne struje.

Može se u nekim izrekama podrazumijevati što je 100 posto. Npr. kažemo: godišnja stopa rasta potrošnje električne energije je 2,5 posto. Premda tu nije rečeno, razumijeva se da je 100 posto potrošnja u prethodnoj godini. Ili, u izreci: u zraku je 78 posto dušika – razumijevamo da u 100 jedinica volumena zraka ima 78 jedinica dušika.

Ravnopravno je pisanje kratice (%) i punog naziva (posto). Dakle, možemo pisati 2,5 posto, ali je kraće 2,5%.

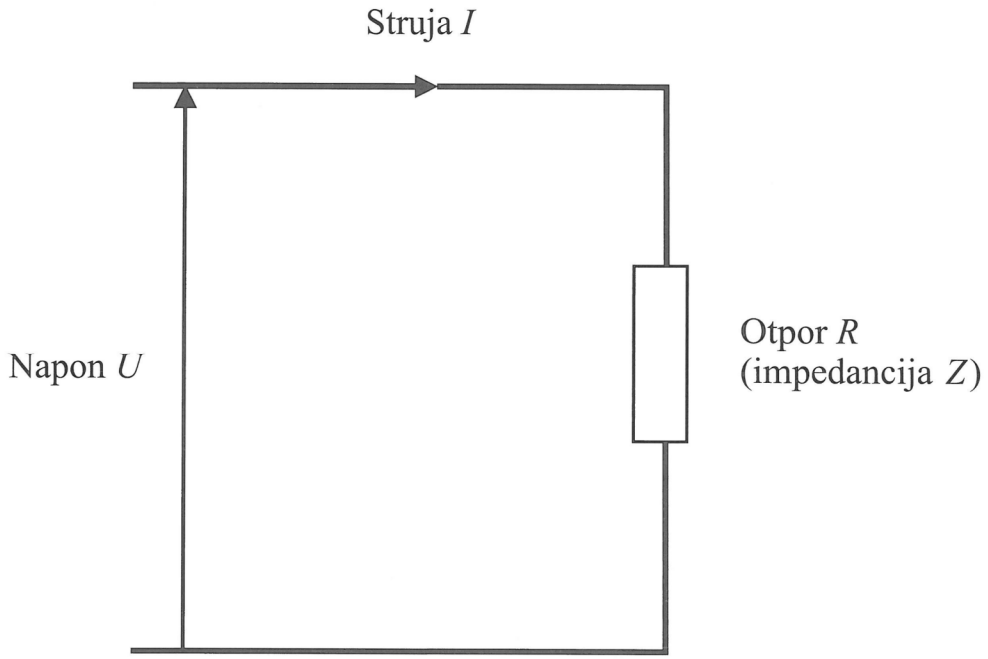
Dodajmo: promil ($^0/_{00}$) je omjerni iskaz prema tisuću, a ppm (parts per million) je omjerni iskaz prema milijun. Dakle, jedan posto je 10 promila, a jedan promil je 1 000 ppm.

# Još neke elektrotehničke jedinice (i *mali* uvod u osnove elektrotehnike)

U daljem izlaganju koristit ćemo se ponekad pojmovima napona, struje i otpora (impedancije), te frekvencije, djelatne i jalove snage, kao i djelatne i jalove energije. Stoga je korisno i uvodno tumačenje poimanja tih veličina i spominjanje jedinica za njihovo mjerenje.

Dovoljno je pojmiti kako je napon ta veličina koja određuje struju (jakost električne struje) u strujnom krugu stanovitog otpora (ako krugom teče istosmjerna struja) odnosno stanovite impedancije (ako krugom teče izmjenična struja).

Te tri veličine povezane su elementarnim zakonom elektrotehnike, Ohmovim zakonom (slika 2.4):




$I = U / R$ (pri istosmjernoj struji)

$I = U / Z$ (pri izmjeničnoj struji)

*Slika 2.4. Uz Ohmov zakon*

struja $I$ = napon $U$ / otpor $R$,

ili napisano samo znakovima veličina (znakove veličina *uvijek* pišemo kosim pismom) kako se uobičajeno koriste:

$$I = U/R. \qquad (2.3)$$

To vrijedi za istosmjernu struju. Za izmjeničnu struju, Ohmov zakon glasi:

$$I = U/Z, \qquad (2.4)$$

gdje $Z$ impedancija kruga kojim teče struja. Istaknimo odmah da impedancija bitno ovisi o frekvenciji napona (odnosno struje); njezinu vrijednost moramo poznavati baš uz onu frekvenciju kojom se mijenja izmjenična struja koja njome teče. Eventualno, *zaboravljamo* na tu ovisnost, radi li se o naponu i struji pri frekvenciji javne električne mreže – to je a priori 50 Hz barem u čitavoj Europi (pa baratamo impedancijama utvrđenim uz tu frekvenciju, premda to niti ne ističemo). Točnije gledajući, i u tom slučaju može biti iznenađenja, mreže su danas *zagađene* tzv. višim harmonicima napona i struje, te je impedancija za svaki harmonik svojstvena frekvenciji tog harmonika[7].

Dakle povećava li se napon u nekom strujnom krugu na dvostruku vrijednost, jednako se povećava i struja u tom krugu na dvostruku vrijednost. Poveća li se otpor (impedancija) tog kruga na dvostruku vrijednost, uz nepromijenjeni napon, struja će pasti na polovinu. Itd.

Jedinica za mjerenje električnog napona je volt (znakom: V). U elektroenergetici govorimo obično samo *napon*, izostavljajući pridjev *električni*; to se podrazumijeva. Veća jedinica je kilovolt, tisuću volta. Električne mreže mogu biti niskonaponske, kod nas uobičajenog izmjeničnog napona 400 volta, srednjonaponske (kod nas uobičajeno 10, 20 ili 35 kilovolta) i visokonaponske (kod nas uobičajeno 110, 220 i 400 kV).

Jedinica za mjerenje struje (točnije govoreći: jakosti električne struje – opet govorimo skraćeno i time moguće unosimo malu zabunu; bez konteksta ne znamo da li je riječ o struji kao pojavi ili o vrijednosti veličine te pojave![8]) je amper (znakom: A). Veća jedinica je kiloamper (1 000 A) a manja jedinica je miliamper (jedna tisućinka ampera).

Konačno, om je jedinica za mjerenje električnog otpora (impedancije, za primjenu pri izmjeničnoj struji). Znakom, piše se velikim grčkim slovom omega (Ω). Opet se koristimo i manjim i većim jedinicama od oma (miliom, kiloom, megaom, ...).

Izlazi da je, prema Ohmovu zakonu, u strujnom krugu kojem je otpor 10 Ω (ili mu je impedancija 10 Ω pri određenoj frekvenciji, koju određuje izmjenični napon na koji je impedancija priključena), pri naponu od 230 V, struja jednaka 230/10 = 23 A.

Spoje li se nekoliko otpornika (otpora $R_1$, $R_2$...) u seriju, zajednički otpor bit će zbroj njihovih pojedinih otpora, dakle

$$R = R_1 + R_2 + ... \qquad (2.5)$$

---

[7] Viši harmonici osnovne frekvencije od 50 Hz su frekvencije koje predstavljaju umnožak prirodnog broja različitog od 1 (dakle: 2, 3, 4, 5...) i osnovne frekvencije; treći harmonik ima frekvenciju 150 Hz, a peti harmonik frekvenciju 250 Hz. I tako dalje... Induktivnoj komponenti impedancije raste otpor s povećanjem frekvencije, a kapacitivnoj komponenti impedancije pada otpor s povećanjem frekvencije.

[8] Električna struja, kao pojava, je usmjereno gibanje električnih naboja. Jakost električne struje, kao mjerna vrijednost te pojave, je količina prostrujalih naboja u jedinici vremena. Prema mogućnosti da vode električnu struju, krute tvari dijelimo na vodiče, poluvodiče i nevodiče (izolatore). Neki metali su dobri vodiči (srebro, bakar, aluminij), odlikuju se slobodnim elektronima, negativnog električnog naboja, čije usmjereno kretanje tvori struju. Pri tome u samom vodiču je *saldo* negativnih elektrona i pozitivnih protona jednak nula. Onoliko elektrona koliko uđe s jedne strane u vodič u strujnome krugu, toliko istvremeno na drugoj strani izađe. Pri struji od jednog ampera, nekim presjekom vodiča svake sekunde prostruji približno 6 milijarda milijardi elektrona! Brzina kretanja tih elektrona je mala, u bakrenom vodiču pri razumnoj gustoći struje ona iznosi samo otprilike jedan milimetar u sekundi. Međutim, naboji se pokrenu istodobno duž cijeloga strujnog kruga, ta pojava odvija se brzinom svjetlosti. U vodljivim tekućinama, električnu struju tvore ioni, to su atomi s neuravnoteženim brojem elektrona i protona.

Vodljivost otpornika je recipročna vrijednost njegova otpora – to je razumljivo: što je veći otpor, manja je vodljivost, a što se otpornik manje opire protjecanju struje, veća mu je vodljivost:

$$G = 1 / R \tag{2.6}$$

odnosno

$$R = 1 / G. \tag{2.7}$$

Vodljivost se mjeri simensima, kraticom S. Dakle je i 1 S = 1/Ω.

Spoje li se nekoliko otpornika (poznatih vodljivosti $G_1$, $G_2$...) paralelno između dva čvorišta, zajednička vodljivost bit će zbroj njihovih pojedinih vodljivosti, čitav sklop postaje *vodljiviji*, dakle

$$G = G_1 + G_2 + ... \tag{2.8}$$

Dva otpornika jednakih otpora, spojena paralelno, imaju zajednički otpor jednak polovini otpora jednog otpornika. Više otpornika različitih otpora, spojenih paralelno, imaju zajednički otpor manji od najmanjeg otpora pojedinih otpornika.

Električni otpor (iskazan omima) kakva vodiča poznate duljine i stalnog poprečnog presjeka, izvedenog iz materijala za koji je znana specifična električna vodljivost je

$$R = \ell / (\kappa \cdot A) \tag{2.9}$$

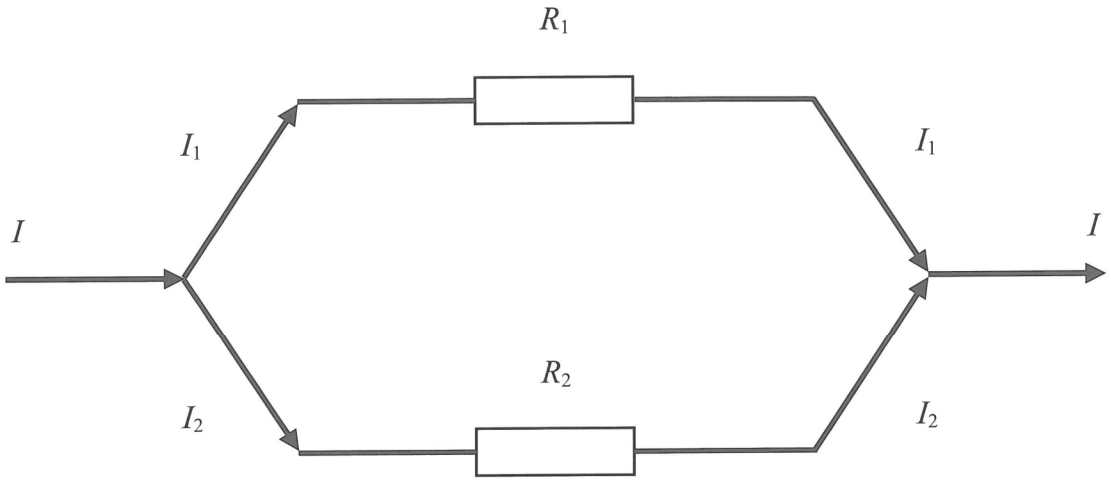
tu su: $\ell$ = duljina vodiča u metrima, $A$ = presjek vodiča u mm$^2$ i $\kappa$ = specifična električna vodljivost u Sm/mm$^2$. Specifična električna vodljivost najčešće korištenih materijala za izvedbu električnih vodiča, kakvi se primjenjuju u elektroenergetici, je približno 56 Sm/mm$^2$ za bakar i 34,5 Sm/mm$^2$ za aluminij, pri +20 °C.

Izlazi da jedan kilometar takvih vodiča presjeka 120 mm$^2$, ima otpor od 0,149 oma (bakreni vodič) odnosno 0,242 oma (aluminijski vodič), na temperaturi od +20 °C.

Porastom temperature, postupno raste otpor vodiča. Temperaturni koeficijent prirasta otpora za bakrene i aluminijske vodiče je približno 0,004 1/K, dakle po svakom kelvinu promjene temperature otpor vodiča se promjeni za četiri promila.

Uzmemo li u obzir najnižu temperaturu na kojoj se u našim klimatskim prilikama može naći vodič (–25 °C) i najvišu temperaturu na kojoj se smije naći opterećeni dalekovodni vodič (+80 °C), razlika je tih temperatura 125 K. Izlazi da se otpor mijenja za 50 posto (0,004 × 125), odnosno u granicama od ±25% oko neke srednje vrijednosti koju bi imao pri temperaturi od +27,5 °C. To nije zanemarivo!

Spomenimo ovdje i prvi Kirchhoffov zakon, ali samo za istosmjernu struju. (Za primjenu tog zakona u mreži izmjenične struje, prilike su složenije, premda – dakako – prvi Kirchhoffov zakon vrijedi i ondje.) Naiđe li struja u nekom čvorištu na grananje, podijeli se po granama. Ako sve grane završavaju u drugom čvorištu, opet je zbroj struja jednak onoj struji koja je dotekla u prvo čvorište (*struja je nestlačiva*). Prvi Kirchhoffov zakon kaže da je zbroj struja koje ulaze u neko čvorište jednak zbroju struja koje iz toga čvorišta izlaze (primjerice: $I = I_1 + I_2$, na slici 2.5).




$$I = I_1 + I_2$$

$$I_1 / I_2 = R_2 / R_1$$

*Slika 2.5. Uz prvi Kirchhoffov zakon i grananje struje*

Imaju li grane između ta dva čvorišta različite električne otpore, struja će se podijeliti po granama. Primijenimo li Ohmov zakon na, primjerice, dvije grane različitih otpora $R_1$ i $R_2$ i nazovemo li struju $I_1$ granom kojoj je otpor $R_1$, a struju $I_2$ granom kojoj je otpor $R_2$, omjer tih struja biti će (prikazano je i to na slici 2.5):

$$I_1 / I_2 = R_2 / R_1, \qquad (2.10)$$

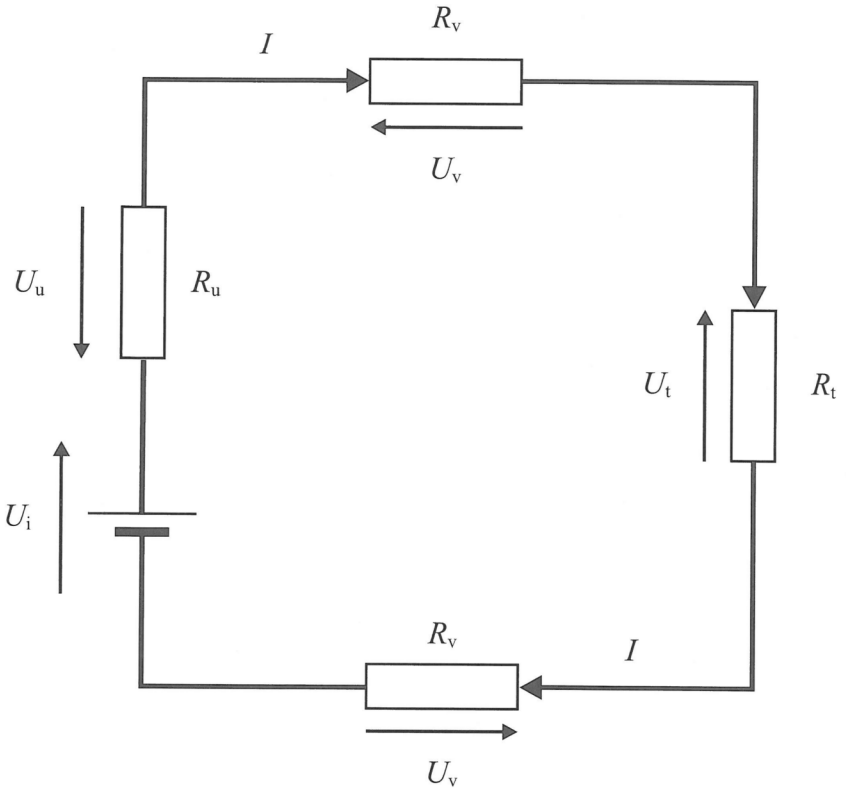
dakle struje će se raspodijeliti po granama obrnuto proporcionalno otporima grana. Veći dio struje teći će granom manjeg otpora a manji dio struje teći će granom većeg otpora. (*Struja teče linijom manjeg otpora!*) Dakako, pri tome, grane moraju počinjati u istom čvorištu a završavati u, također istom, a drugom čvorištu.

Drugi Kirchhoffov zakon govori o naponima. Kaže, da je zbroj narinutih napona u nekom strujnom krugu jednak zbroju napona (protunapona, padova napona) na pojedinim trošilima tog kruga. Ako je samo jedan zarinuti napon u krugu, primjerice vrijednosti 12 V (odmjeren u praznom hodu tog naponskog izvora), te padovi napona na svakom spojnom vodiču do trošila po 0,25 V, a pad napona na unutarnjem otporu izvora 0,5 V, napon na trošilu će biti (sukladno drugom Kirchhoffovu zakonu): $12 - 2 \times 0{,}25 - 0{,}5 = 11$ volta, slika 2.6. (Opet su prilike računski složenije, kod primjene tog zakona u krugovima izmjenične struje, ali on vrijedi i tamo!)

Snaga kod istosmjerne struje je umnožak napona na trošilu i struje koja protječe tim trošilom, odnosno napona izvora električne struje i jakosti struje koja teče tim izvorom. Uz znakove za snagu $P$, za napon $U$ i za struju $I$, pišemo:

$$P = U \cdot I. \qquad (2.11)$$

Dakle, kod istosmjernog napona 100 V i struje 10 A, snaga je 1 000 W, odnosno 1 kW.




$I$ = struja krugom

$R_u$ = unutarnji otpor izvora

$R_v$ = otpor spojnog vodiča

$R_t$ = otpor trošila

$U_i$ = napon izvora u praznom hodu

$$U_i = U_u + 2 \cdot U_v + U_t$$

*Slika 2.6. Uz drugi Kirchhoffov zakon*

Energija ($E$), dobiva se umnoškom snage ($P$) i trajanja ($T$) koje je proteklo od početka razdoblja za koje želimo iskazati energiju, pa uz relaciju (2.2) izlazi

$$E = U \cdot I \cdot T. \qquad (2.12)$$

Ako napon iskažemo voltima, struju amperima a trajanje sekundama, rezultat će biti u džulima (vatsekundama). Uz napon na nekom trošilu 230 V, te struju koja protječe tim trošilom 10 A u trajanju od 30 sekunda, trošilom će se utrošiti energija 230 × 10 × 30 = 69 000 džula ili 0,069 MJ. Ili, iskazano drugačije (uz 1 kWh = 3,6 MJ): 0,069/3,6 = 0,019 kilovatsati. Traje li priključak tog trošila tri sata, tada bi se utrošila energija od

230 × 10 × 3 = 6 900 vatsati ili 6,9 kilovatsati.

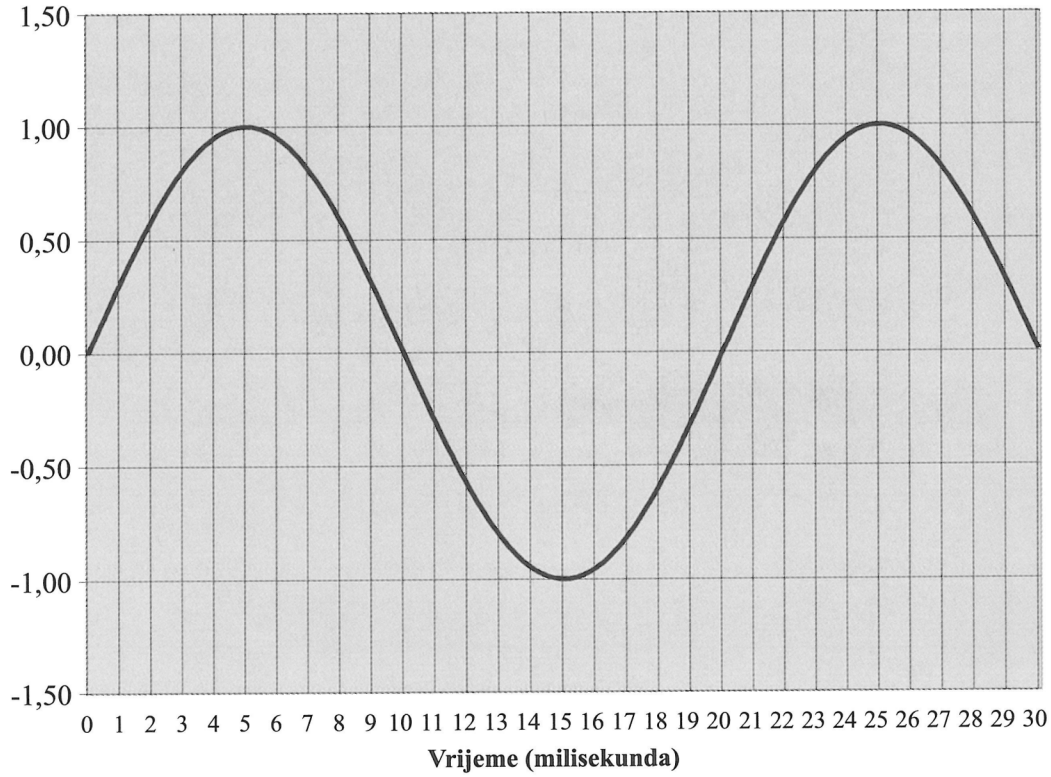
U mrežama izmjenične struje moramo gledati nešto kompleksnije, pa iznesimo potrebno razlikovanje u gledanju, ako je riječ se o istosmjernoj ili izmjeničnoj struji.

Izrecimo najprije veličinu koja bitno označuje izmjenične pojave (napona i struje): to je frekvencija kojom izričemo broj cjelovitih perioda sinusne izmjenične struje (ili napona) u jednoj sekundi. Frekvenciju mjerimo u hercima; standardna europska frekvencija u javnim mrežama izmjenične struje je 50 herca (50 Hz). Dakle, uz toliku frekvenciju, 50 puta u jednoj sekundi dođe do potpune sinusne izmjene; struja poraste od nule do tjemene vrijednosti, padne opet na nulu i počinje teći u suprotnom smjeru, da bi opet narasla na tjemenu vrijednost, ali tog – suprotnog smjera, opet se smanjuje da bi pala na nulu i počela ponovno rasti, ali u prvotnom smjeru – počinje nova perioda. Dodajmo, frekvencija istosmjerne struje je – razumljivo – 0 herca, nema promjene u po volji dugom vremenu.

Govorimo o sinusnom vremenskom obliku struje i napona. Generatori izmjenične struje tako su konstruirani da daju upravo takav oblik napona, a onda je – prema Ohmovu zakonu – sinusna i struja koja teče impedancijom[9] priključenom na taj generator. Sinusno vremenski promjenjive pojave nazivaju se harmonijskim pojavama; to su pojave koje se ritmički ponavljaju, neprekidno rastu i smanjuju se uz sinusnu ovisnost o vremenu.

Ako je znana frekvencija $f$ u hercima, trajanje jedne periode sinusne pojave $T$ u sekundama je:

$$T = 1/f. \qquad (2.13)$$




*Slika 2.7. Sinusna vremenska promjena napona ili struje uz frekvenciju* 50 *Hz (Amplitudna vrijednost 1)*

[9] Vrijedi u slučaju da ta impedancija ima stalnu vrijednost pri bilo kojem naponu, tada govorimo o *linearnoj* ovisnosti struje i napona.

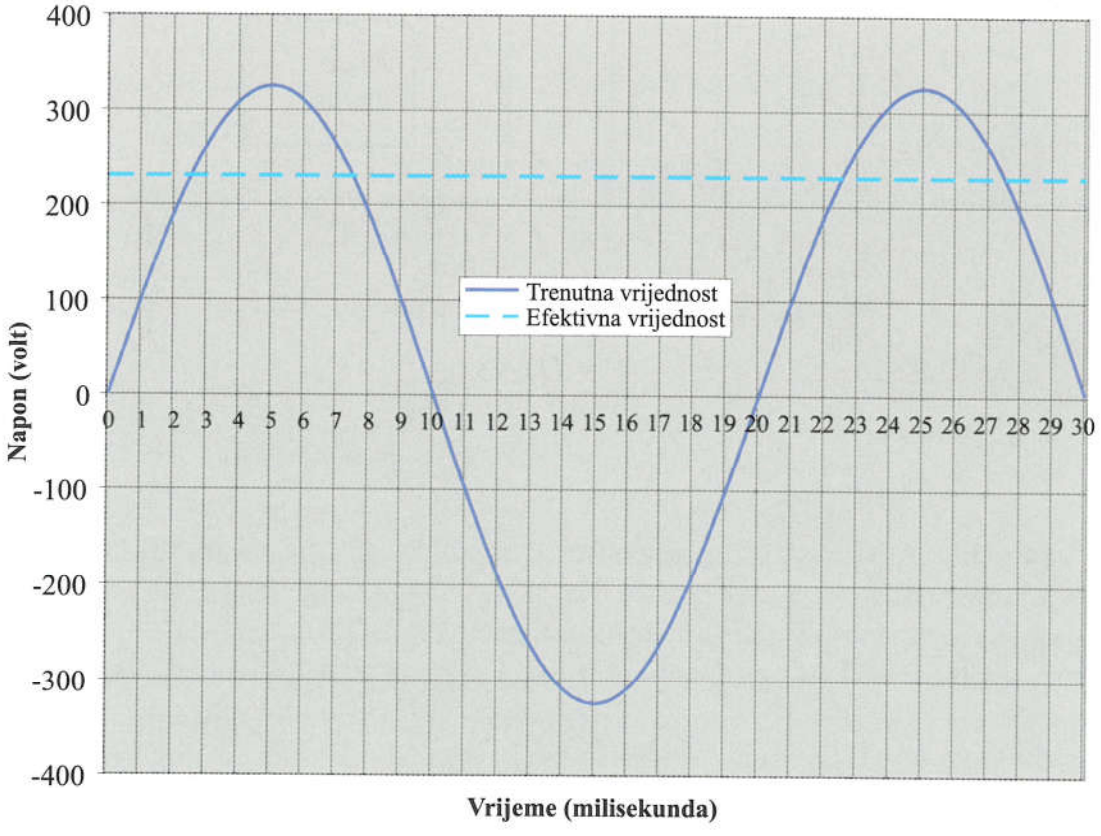
Dakle, uz frekvenciju 50 Hz, trajanje jedne periode je jedna pedesetinka sekunde, odnosno 0,02 sekunde ili 20 milisekunda (slika 2.7).

Potrebna je još i konvencija kojom se uređuje veza među vrijednostima veličina izmjenične struje i vrijednostima veličina istosmjerne struje. Iskažimo tu konvenciju: efektivnom vrijednošću promatrane izmjenične sinusne struje razumijevat ćemo onu vrijednost istosmjerne struje koja na istom otporniku razvije jednako topline kao i promatrana izmjenična struja. To će biti neka vrijednost manja od tjemene vrijednosti (amplitude), jer tjemena vrijednost postoji smo u nekom trenutku, izvan tog trenutka struja je manja (ili čak nula). Prema takvoj konvenciji, efektivna je vrijednost sinusne veličine jednaka tjemenoj vrijednosti podijeljenoj s drugim korijenom iz dva ($\sqrt{2}$), ili je:

Efektivna vrijednost (struje, napona) = 0,707 × Tjemena vrijednost (struje, napona),
jer je $\sqrt{2} = 1{,}41$, a $1/\sqrt{2} = 0{,}707$.

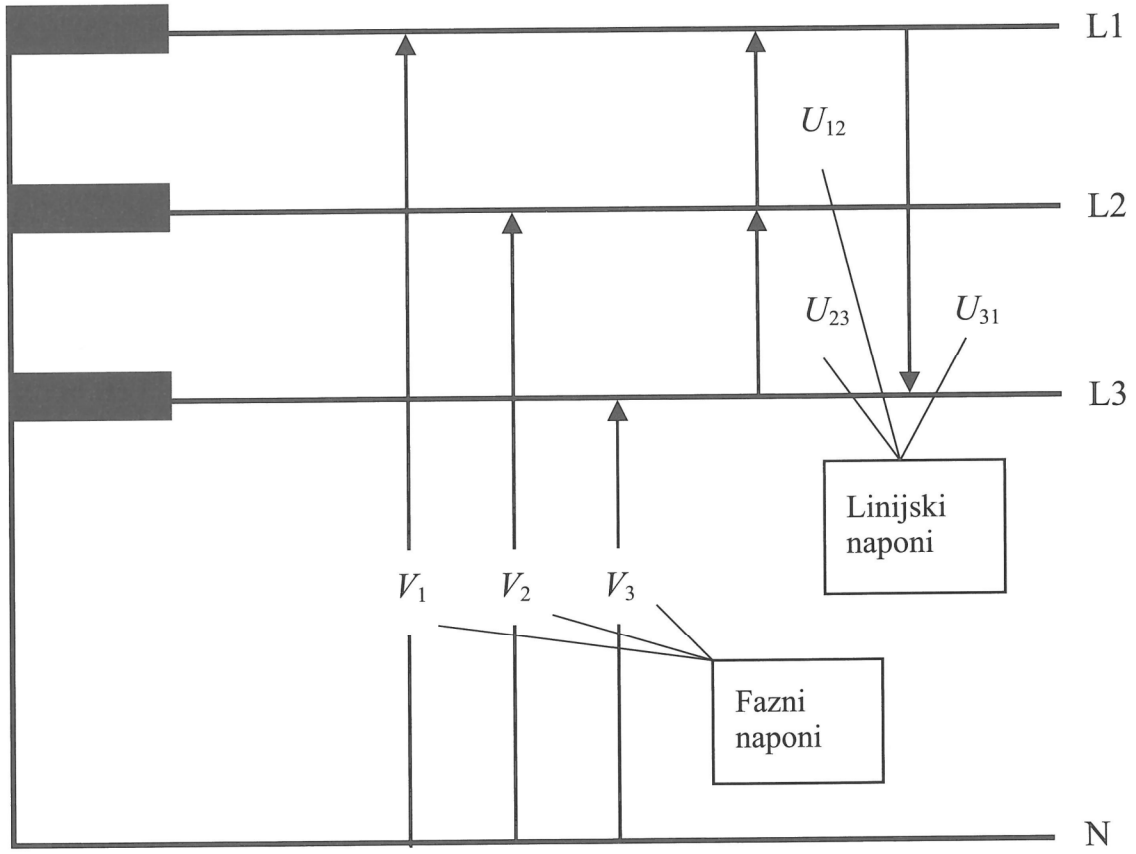
Obrnuto je:
Tjemena vrijednost (struje, napona) = 1,41 × Efektivna vrijednost (struje, napona).

Govorimo li ili pišemo o vrijednosti izmjeničnih struja ili napona, tada ne ćemo ni isticati kako se radi o efektivnoj vrijednosti; to se naprosto podrazumijeva. Dakle ako kažemo da je napon u jednofaznoj električnoj mreži 230 V, to znači da je upravo efektivna vrijednost tog napona 230 volta. Zanima li nas tjemena vrijednost, to bismo onda istakli, te rekli ili napisali da je tjemena vrijednost tog napona 324,3 V, dobiveno množenjem 1,41 × 230 (slika 2.8).




*Slika 2.8. Trenutna vrijednost izmjeničnog napona efektivne vrijednosti* 230 V

Moramo još nešto reći i o vrijednostima veličina u trofaznim električnim mrežama, jer se one u pravilu primjenjuju u elektroenergetici. Generatori u takvim mrežama mogu biti spojeni u zvijezdu ili trokut, kao i trošila. Spoje li se u zvijezdu, moguće je mjeriti napon između faza (međufazni napon, linijski napon) $U_{12}$, $U_{23}$ i $U_{31}$ ili između pojedine faze i zvjezdišta, fazni napon $V_1$, $V_2$ i $V_3$ (slika 2.9). Trenutne vrijednosti napona u trofaznom su-




$$U = \sqrt{3} \cdot V$$

$$V = U / \sqrt{3}$$

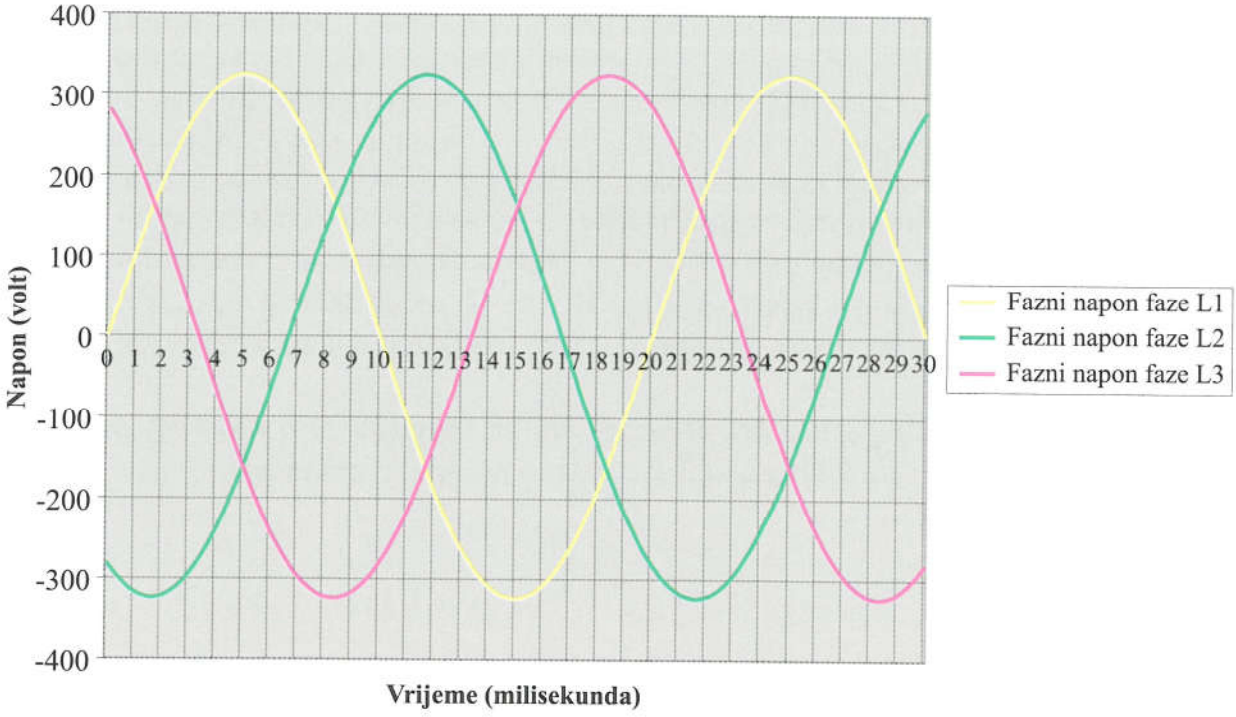
*Slika 2.9. Linijski i fazni naponi u trofaznim mrežama*

stavu, za trećinu su periode fazno pomaknute; napon druge faze slijedi napon prve faze s tolikim faznim pomakom, a napon treće faze slijedi napon druge faze s isto tolikim faznim pomakom, u simetričnom trofaznom sustavu napona (slika 2.10).

Veza između međufaznog i faznog napona u simetričnom trofaznom sustavu je drugi korijen iz tri ($\sqrt{3} = 1{,}73$):

Međufazni napon ($U$) = 1,73 × Fazni napon ($V$).

Međufazni napon obično označujemo s $U$, a fazni napon s $V$. Razlikovati treba $V$ napisano kosim slovom, tada je to veličina napona, a V napisano okomitim slovom je znak volta.




*Slika 2.10. Trenutne vrijednosti faznih napona trofaznog simetričnog sustava efektivne vrijednosti napona* 230 V *pri frekvenciji* 50 Hz (V)

Kada govorimo o vrijednostima veličina u trofaznim mrežama, opet kažemo ili pišemo samo *napon* a ne kažemo da se to odnosi na međufazni napon. Iskazujemo li faznu veličinu, to obvezno istaknemo. Dakle, govorili ili pisali bismo: naponu od 400 volta odgovara fazni napon od 231 volt u trofaznom sustavu. Izostavili smo pridjev *međufazni* ispred izricanja prvog napona, a rezultat za fazni napon dobili smo tako što smo vrijednost (međufaznog) napona podijelili s drugim korijenom iz tri (400/1,73 = 231). Uobičajeno, toliki fazni napon zaokružujemo na iznos od 230 volta.

Trenutak je i da se izrekne Jouleov (Džulov) zakon, koji kaže koliko se topline razvije na otporniku poznatog otpora ako njime teče istosmjerna struja poznate vrijednosti. Jouleov zakon kaže, da je električna snaga koja se razvije na otporniku u toplinu, jednaka struji koja teče tim otpornikom na kvadrat puta otpor tog otpornika:

$$P = I^2 \cdot R. \qquad (2.14)$$

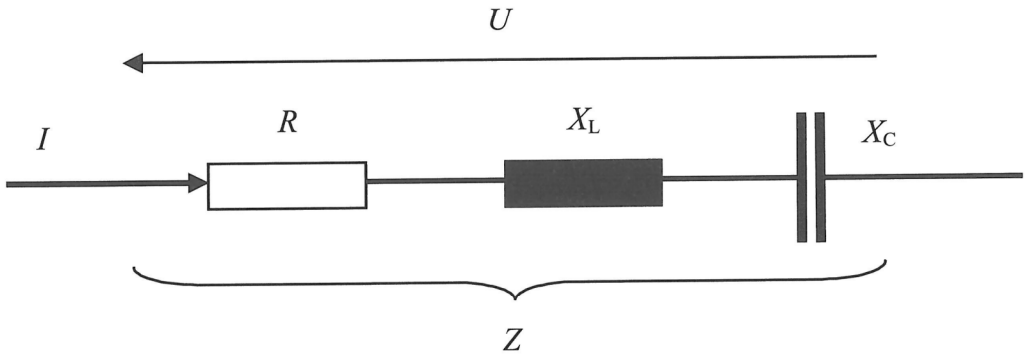
Dakle, ako otpornikom otpora 10 oma teče istosmjerna struja od 10 ampera, toplina u koju se pretvara električna snaga na tom otporniku je: $10^2 \times 10 = 1\,000$ vata.

Teče li nekom impedancijom izmjenična struja, moramo poznavati komponentu te impedancije na kojoj se razvija toplina i tu ćemo komponentu zvati *djelatnim otporom (*ili *radnim otporom).* Tada vrijedi ponovno Jouleov zakon, ali za samo djelatni otpor (dakle za tu komponentu impedancije). Opet je toplina, iskazana električnom snagom jednaka struji na kvadrat puta djelatni otpor. Dakako: uzima se efektivna vrijednost struje na kvadrat. Tu električnu snagu nazvat ćemo *djelatna snaga* (*aktivna snaga*), jer se ona pretvara iz električnog oblika u drugi oblik, u *djelovanje*. I elektromotor ima djelatnu snagu, to je ona snaga

koja se realizira na osovini motora kao mehanička snaga. Dakle, djelatna je snaga onaj dio električne snage koji se na mjestu potrošnje pretvara u koristan oblik: svjetlo, toplinu, mehanički ili kemijski oblik, napustivši nepovratno elektroenergetski sustav. Iskazuje se vatima (W), kilovatima (kW) ili drugim višekratnicima od vata. Suprotno, električna djelatna snaga na mjestu njezine proizvodnje traži utiskivanje tolike snage ali nekog drugog oblika energije u elektroenergetski sustav, primjerice mehaničke snage na osovini turbogeneratora.

Struja od 10 ampera (dakle tolika efektivna vrijednost, radi li se o izmjeničnoj struji) razvije 1 000 W na otporniku kojemu je otpor 10 oma (ili mu je djelatni otpor 10 oma, ako kroz njega teče izmjenična struja), bez obzira na to radi li se o tolikoj izmjeničnoj ili istosmjernoj struji.

Razmotrimo još malo pobliže tzv. *prividni otpor* ili *impedanciju Z* serijskog spoja, kod izmjenične struje (slika 2.11). Ona ima djelatnu komponentu (rezistanciju) *R* i jalovu komponentu (reaktanciju) *X*.




$$X = X_L - X_C$$

$$Z = \sqrt{(R^2 + X^2)}$$

*Slika 2.11. Impedancija serijskog spoja*

Djelatna komponenta *R* predstavlja onaj dio impedancije na kojem se ostvaruje pretvorba električnog oblika energije u kakav drugi oblik energije, napuštajući električni krug. Radi li se o vodiču – odvija se pretvorba u toplinu (Jouleov zakon) i djelatni otpor vodiča pri izmjeničnoj struji jednak je otporu tog istog vodiča pri istosmjernoj struji, za ne prevelike frekvencije (kakva je, primjerice, frekvencija javne električne mreže: 50 Hz). Pri većim frekvencijama, a osobito pri vrlo visokim frekvencijama, raste djelatni otpor vodiča spram otpora tog vodiča pri istosmjernoj struji zbog potiskivanja struje prema oplošju vodiča, to većeg što je frekvencija veća. Djelatni otpor je, dakle, ovisan o frekvenciji, ali to nije naglašeno u području vrlo niskih frekvencija.

Jalova komponenta rezultanta je induktiviteta i kapaciteta. Iduktivitet predstavlja jalovi otpor (induktivnu reaktanciju) ovisan o frekvenciji

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \qquad (2.15)$$

Tu su: $X_L$ jalovi otpor svitka u omima, $f$ je frekvencija struje (u hercima) koja teče svitkom i $L$ je induktivitet svitka (u henrijima); stalan, ako je riječ o svitku u zraku ili kakvom neferomagnetskom materijalu, a nestalan ako je riječ o svitku namotanom na feromagnetski materijal, željezo. Induktivitet svitka namotanog na jezgru iz feromagnetskog materijala, ovisi o trenutnoj vrijednosti struje koja teče svitkom i to nelinearno. Što su induktivitet svitka i frekvencija veći, jalovi otpor svitka je veći. Primjerice, jalovi otpor svitka induktiviteta 10 mH pri frekvenciji 50 Hz je 3,14 Ω, a pri frekvenciji od 100 kiloherca jalovi otpor tog istog svitka je 6,28 kilooma.

Kapacitet predstavlja jalovi otpor (kapacitivnu reaktanciju) ovisan o frekvenciji

$$X_C = 1 / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot C) \qquad (2.16)$$

Tu su: $X_C$ jalovi otpor kondenzatora u omima, $f$ je frekvencija struje (u hercima) koja teče kondenzatorom i $C$ je kapacitet kondenzatora (u faradima). Što su kapacitet kondenzatora i frekvencija veći, jalovi mu je otpor manji. Primjerice, kondenzator kapaciteta 10 mikrofarada ima pri frekvenciji 50 Hz jalovi otpor od 318 Ω, a kondenzator od 100 mikrofarada uz istu frekvenciju ima jalovi otpor od 31,8 Ω.

Rezultantni jalovi otpor (rezultantna reaktancija) pri serijskom spoju svitka i kondenzatora je

$$X = X_L - X_C \qquad (2.17)$$

Kako su jalovi otpor kondenzatora i jalovi otpor svitka suprotno ovisni o frekvenciji (prvi opada s porastom frekvencije a drugi se smanjuje) postoji jedna određena frekvencija pri kojoj su oni baš jednaki, rezultantni jalovi otpor bi tada bio jednak nula – to je *rezonantna frekvencija* takvog sklopa. Pri rezonantnoj frekvenciji čitav sklop ponašao bi se kao impedancija sa samo djelatnim otporom.

Impedancija (prividni otpor) serijskog spoja otpornika, svitka i kondenzatora je

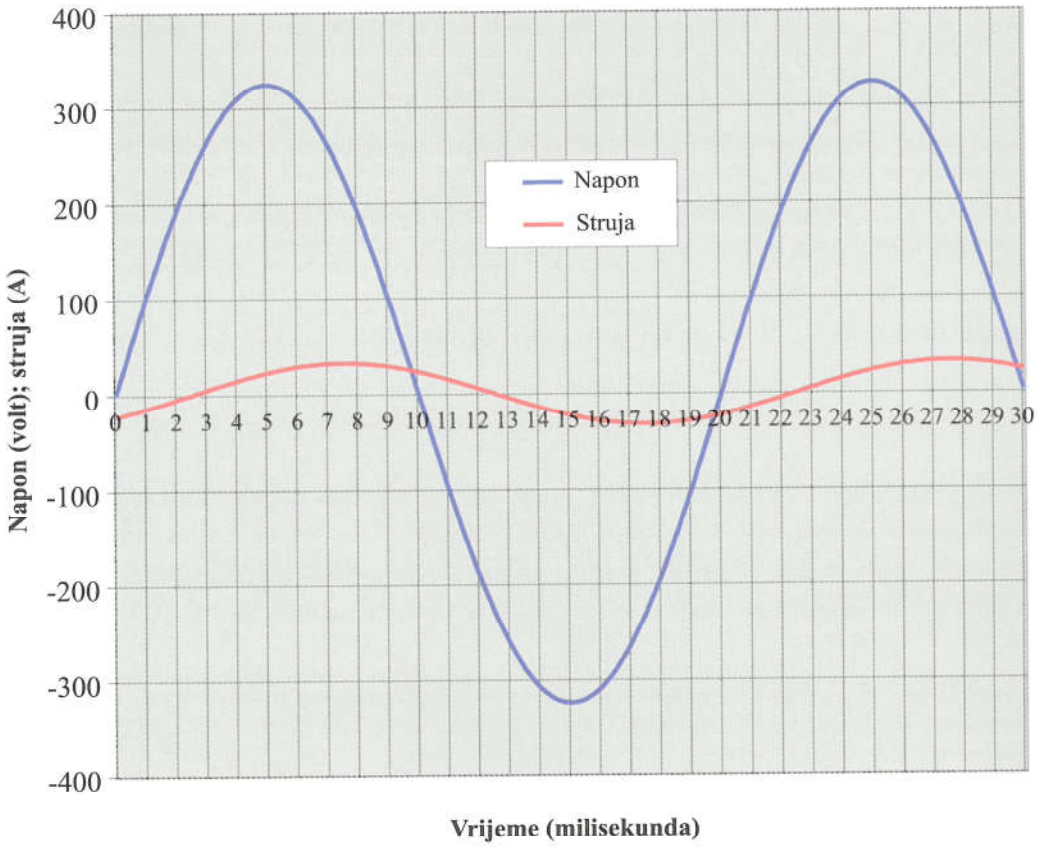
$$Z = \sqrt{(R^2 + X^2)}. \qquad (2.18)$$

Svojstveni trokut kojem bi odgovarao Pitagorin poučak napisan na gornji način imao bi hipotenuzu $Z$ te katete $R$ i $X$. Kut između djelatnog otpora (prileţeće katete) i impedancije (hipotenuze) naziva se kut impedancije i uobičajeno označava s $\varphi$, slika 2.13.

Taj kut $\varphi$ određuje fazni pomak između izmjeničnog napona na koji je priključena ta impedancija i struje koja teče tom impedancijom[10]. Ako bi kut impedancije bio jednak nula, induktivna reaktancija je jednaka kapacitivnoj ili se radi o grani u kojoj uopće nema jalova otpora, ne bi bilo niti faznog pomaka između napona i struje, sva struja bi bila čisto djelatna, govorili bismo o struji i naponu koji su *u fazi*.

Spojeni li su u seriju otpornik djelatnog otpora 7 oma, svitak induktivne reaktancije 17 oma i kondenzator kapacitivne reaktancije 10 oma (te obje reaktancije određene su pri frekvenciji struje koja će teći tim serijskim spojem ili napona na koji će biti priključen taj serijski spoj), tada ćemo impedanciju odrediti tako da najprije odredimo rezultantni jalovi

[10] Tom kutu odgovara *vremenski* pomak između sinusiode napona i sinusoide struje. Pri tome, trajanju pune periode (dakle trajanju od 20 milisekunda, pri 50 Hz) odgovara 360 kutnih stupnjeva (360°). Primjerice, četvrt poluperiode traje 2,5 ms, tome odgovara fazni kut od 45°.




*Slika 2.12. Fazno pomaknuti napon i struja pri* 50 Hz
*(Fazni pomak: četvrtina poluperiode)*

otpor $X = 17 - 10 = 7$ oma i potom impedanciju $Z = \sqrt{(7^2 + 7^2)} \approx 10$ oma. Priključimo li je na izmjenični napon od 230 V, struja bi bila 23 A (= 230/10, po Ohmovu zakonu), pomaknuta za kut $\varphi$ prema naponu, u tom slučaju upravo za četvrtinu poluperiode (slika 2.12).

Kod serijskog ili paralelnog spajanja impedancija, prilike su kompleksnije nego što su bile pri spajanju otpornika primijenjenih u krugovima istosmjerne struje, jer impedancije sadrže, pored djelatnog otpora, u različitim mogućim kombinacijama i jalovi otpor, te to usložnjava račun zajedničke impedancije. Ipak kažimo: kod serijskog spoja impedancija, zbroje im se djelatni otpori i algebarski zbroje jalovi otpori (induktivni s pozitivnim znakom, kapacitivni s negativnim znakom), pa se iz tih zbrojeva izračuna zajednička impedancija prema općoj relaciji za impedanciju (2.18).

Protumačimo sada i jalovu snagu. Dolazi u obzir samo ako je u razmatranju mreža izmjenične struje. *Jalova snaga* (*reaktivna snaga*) je onaj dio električne snage koji služi uspostavljanju i razgradnji izmjeničnih magnetskih i električnih polja, u vremenskom ritmu frekvencije izmjenične struje i napona. Prirodi tih pojava svojstveno je da je vremenski ritam uspostave i razgradnje magnetskog polja suprotan ritmu razgradnje i uspostave električnog polja; te se dvije pojave međusobno usklađeno prožimaju i stoga jalova snaga *njiše* između mjesta njezine potrošnje i mjesta njezine proizvodnje, ne napuštajući pri tome elektroenergetski sustav. Iskazuje se varima (u nominativu jednine: var, pisano *malim* slovima!), ili višekratnicima od vara (kvar, Mvar, ...)

Govorimo o potrošnji i proizvodnji jalove snage, pravilnije bi bilo govoriti o opterećenju jalovom snagom, jer jalova snaga ili energija ne napušta elektroenergetski sustav, dakle

*ne troši* se. Međutim, uvriježilo se uz potrošnju djelatne snage ili energije (koja se doista *troši*, napuštajući nepovratno elektroenergetski sustav) vezati i *potrošnju* one jalove snage i energije koju potražuju magnetski krugovi, jer su oni nezaobilazni pri korištenju električnom energijom, ponajprije elektromotorima. Dosljedno tome, *proizvodnjom* jalove snage ili energije nazivamo jalovu snagu ili energiju suprotnog ritma uspostave, koja se ostvaruje u kondenzatorima ili naduzbuđenim generatorima u mreži. (Generator u poduzbuđenom stanju ponaša se kao prigušnica, dakle *troši* jalovu energiju.)

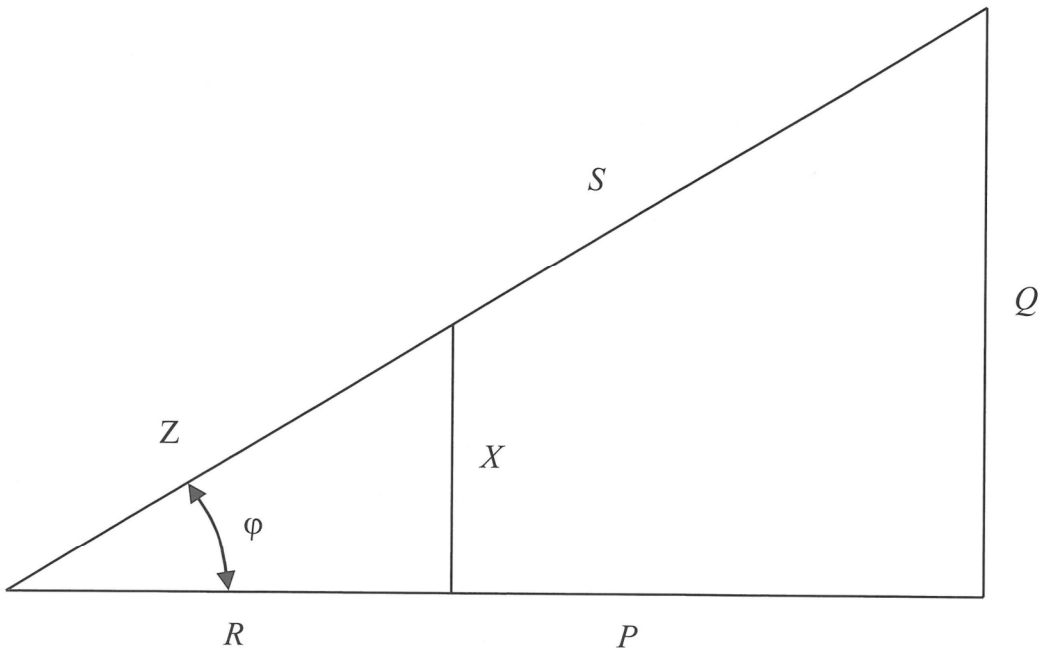
Ako je znana djelatna i jalova snaga nekog trošila ili opterećenog generatora, onda se njihov ukupan iznos naziva *prividna snaga* i ne dobiva se zbrajanjem djelatne i jalove komponente, nego korjenovanjem zbroja njihovih kvadrata. Dakle, ako je $P$ djelatna snaga a $Q$ jalova snaga, tada je prividna snaga:

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2)}. \tag{2.19}$$

Prividna je snaga jednaka umnošku efektivnih vrijednosti napona $U$ i struje $I$:

$$S = U \cdot I. \tag{2.20}$$

Prividna se snaga iskazuje voltamperima (znakom: VA) ili opet višekratnicima: kilovoltamperima (kVA), megavoltamperima (MVA) ili gigavoltamperima (GVA). Dakako, ako je u ranijoj relaciji djelatna snaga iskazana kilovatima, a jalova snaga kilovarima, rezultat će biti iskazan kilovoltamperima.




$$Z^2 = R^2 + X^2$$

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

*Slika 2.13. Trokut otpora i trokut snage pri serijskom spoju djelatnog otpora R i jalovog otpora X*

Vrijednosti prividne, djelatne i jalove snage nalaze u simboličkom trokutu (za koji vrijedi malo prije izrečen Pitagorin poučak), kojemu su djelatna i jalova snaga katete pod pravim kutom, a prividna snaga hipotenuza (slika 2.13). Prividna snaga $S$ opet je pod kutom $\varphi$ prema prileţećoj kateti $P$, istim onim koji određuje fazni pomak napona i struje, odnosno onim koji određuje trokut otpora. Omjer djelatne snage i prividne snage je kosinus kuta između prividne i djelatne snage ($\cos \varphi$) i naziva se *faktor djelatne snage.* To je broj kojim se iskazuje koliko se prividne snage iskorištava na djelatni način. Stoga je djelatna snaga

$$P = S \cdot \cos \varphi = U \cdot I \cdot \cos \varphi. \qquad (2.21)$$

Ako je faktor djelatne snage upravo jedan, tada se sva prividna snaga iskorištava na djelatni način. Ako je faktor djelatne snage jednak nula, tada se ništa od prividne snage ne iskorištava na djelatni način. Realno, faktor djelatne snage je između 0 i 1, što je on veći to je povoljniji udio djelatne u prividnoj snazi.

Ukupna struja trošilima, priključnim vodičima i izvorom izmjenične struje, određena je prividnom snagom, a ne – kako bismo moguće pomislili – djelatnom snagom:

$$I = S/U \qquad (2.22)$$

Ona opterećuje sve jedinice mreže kojima teče; određuje potrebne dimenzije tih jedinica mreže. Stoga je važno da faktor djelatne snage ne bude nepovoljno malen, jer je tada struja koja teče tom mrežom nedjelotvorna.

Dakako, struja se može odrediti i iz djelatne snage, samo onda moramo poznavati i faktor djelatne snage, pa je tada struja $I = P/(U \cdot \cos \varphi)$, prema (2.22).

Iskažimo i omjer jalove snage i prividne snage. To je sinus opet istog kuta $\varphi$ između prividne i djelatne snage ($\sin \varphi$) koji se naziva *faktor jalove snage*; to je broj kojim se iskazuje koliko se prividne snage iskorištava na jalovi način. Stoga je jalova snaga

$$Q = S \cdot \sin \varphi = U \cdot I \cdot \sin \varphi. \qquad (2.23)$$

Ako je faktor jalove snage upravo jedan, tada se sva prividna snaga iskorištava na jalovi način, ništa na djelatni način. Ako je faktor jalove snage jednak nula, tada se ništa od prividne snage ne iskorištava na jalovi način. Realno, faktor jalove snage je između 0 i 1, što je on veći to je veći udio jalove u prividnoj snazi a ujedno – ali i nepovoljno – manji udio djelatne snage.

Pojmom djelatne energije razumijevamo onu energiju koja je tijekom stanovitog trajanja $T$ napustila elektroenergetski sustav, preoblikovavši se u neku korisnu energiju. Djelatna energija je dakle:

$$E_d = P \cdot T, \qquad (2.24)$$

a mjeri se primjerice kilovatsatima, megavatsatima ... teravatsatima (kWh, MWh, ... TWh).

Jalovom energijom smatramo onu energiju koja je tijekom istog trajanja $T$ njihala između mjesta njezina gomilanja u magnetskom polju i mjesta njezina gomilanja u električnom polju, bez napuštanja elektroenergetskog sustava:

$$E_j = Q \cdot T, \tag{2.25}$$

a mjeri se primjerice kilovarsatima, megavarsatima, gigavarsatima... (kvarh, Mvarh, Gvarh, ...).

Konačno prividnom energijom zovemo onu energiju koja se sastoji iz djelatne i jalove komponente, koja je dakle

$$E = S \cdot T, \tag{2.26}$$

odnosno $E = U \cdot I \cdot T$, kako smo već pokazali relacijom (2.12) za istosmjernu struju.

Mjeri se primjerice voltampersatima, kilovoltampersatima, itd. (VAh, kVAh...). Rijetko se iskazuje, radije baratamo njezinim komponentama: djelatnom i jalovom.

U trofaznim simetrično opterećenim sustavima, prividna snaga će biti trostruka vrijednost fazne snage. Spojeno li je trošilo u zvijezdu, jedna faza imat će prividnu snagu: fazni napon × struja. Trostruka vrijednost čini trofaznu prividnu snagu, ona je dakle 3 × fazni napon × struja. Iskažemo li fazni napon međufaznim naponom

($V = U/\sqrt{3}$) tada izlazi da je trofazna snaga (uz činjenicu da je $3 = \sqrt{3} \cdot \sqrt{3}$):

trofazna prividna snaga $= 3 \cdot U/\sqrt{3} \cdot I = \sqrt{3} \cdot \sqrt{3} \cdot U/\sqrt{3} \cdot I$,

dakle je trofazna prividna snaga u simetrično opterećenim trofaznim sustavima jednaka korijen iz tri puta napon (međufazni) puta struja:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \tag{2.27}$$

Trofazna djelatna snaga u takvu sustavu je:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi, \tag{2.28}$$

a trofazna jalova snaga je:

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi. \tag{2.29}$$

Dakako, jedinice za mjerenje djelatne i jalove snage te djelatne i jalove energije, u trofaznom sustavu, iste su kao i za te veličine u jednofaznom sustavu.

Struja koja teče svakim faznim vodičem simetrično opterećenog trofaznog sustava određena je opet prividnom snagom:

$$I = S / (\sqrt{3} \cdot U). \tag{2.30}$$

Radi li se o kakvu trofaznom trošilu kome je znana trofazna korisna snaga (dakle ona koja se predaje iz trošila kao djelatna snaga, primjerice mehanička snaga na osovini elektromotora) $P_2$, te je znan stupanj djelovanja tog trošila pri toj snazi $\eta$:

$$\eta = P_2 / P_1 \tag{2.31}$$

tada ćemo odrediti ulaznu električnu snagu $P_1$ u to trošilo:

$$P_1 = P_2 / \eta. \tag{2.32}$$

Pri tome je uvijek $\eta < 1$, jer ne poznajemo trošilo bez gubitaka (*perpetuum* mobile druge vrste nije moguć), pa je i ulazna snaga $P_1$ uvijek veća od izlazne snage $P_2$ ($P_1 > P_2$).

Konačno, struja u svakoj od tri faze je (iskazana ulaznom snagom):

$$I = P_1 / (\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi), \tag{2.33}$$

a iskazana izlaznom snagom (koja je najčešće znana, jer je ona korisna, ona se iskorištava u nekom korisnom obliku):

$$I = P_2 / (\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot \eta). \tag{2.34}$$

Tu je cos $\varphi$ faktor djelatne snage tog trošila pri toj snazi[11]. Govorili smo za stupanj djelovanja i faktor djelatne snage *pri toj snazi*. Doista, ta dva parametra u pravilu se mijenjaju ako se opterećenje tog trošila mijenja ili se može mijenjati, pa mora biti znano uz koje su opterećenje iskazani.

Spominjemo i pojam *opterećenje*. To je sinonim za izlaznu snagu nekog trošila ili izvora energije ali u nekim određenim, trenutnim prilikama. Nazivna snaga je maksimalna trajna, dugotrajna snaga tog trošila ili izvora, a opterećenje je snaga kojom je to trošilo ili izvor trenutno angažirano. Očito, u normalnim prilikama, opterećenje može biti između nula i nazivne snage (trošila, izvora).

Moguće je dopušteno i kratkotrajno *preopterećenje*; iskazuje se obično u postocima nazivne snage i specificiraju se uvjeti pod kojima je ono dopušteno i koliko najviše smije trajati. Najvažniji uvjet za dopušteno preopterećenje je trajanje i veličina prethodnog opterećenja te temperatura okoline.

Ako je prethodno dugotrajnije opterećenje bilo jednako nazivnoj snazi pri normalnoj temperaturi okoline (primjerice +20 °C), tada je dopušteno preopterećenje najčešće jednako nula. Dakle, nije dopušteno preopterećenje. Ako je prethodno dugotrajnije opterećenje bilo recimo 90 posto nazivne snage, onda će za neki uređaj biti specificirano kako je dopušteno preopterećenje recimo 10 posto u trajanju od 1 sata, a 15 posto u trajanju od 30 minuta – pri temperaturi okoline +20 °C.

To je posljedica činjenice da je nazivna snaga nekog općeg uređaja određena ponajprije dopuštenom temperaturom zagrijanja njegovih vitalnih dijelova a to zagrijanje je posljedica struje koja teče tim uređajem. Kako je znano, neizbježna toplina po Jouleovu zakonu jednaka je kvadratu struje pomnoženom s djelatnim otporom tog uređaja, pa što je struja veća to zagrijanje raste s njezinim kvadratom. Pri stalnoj struji, tijelu postupno raste nadtemperatura (razlika njegove temperature i temperature okoline), sve dok se proizvođena toplina ne izjednači s odvođenom toplinom, predajom okolini. Nadtemperatura raste sporije ili brže, ovisno o toplinskoj vremenskoj konstanti tog uređaja, ali nikada ne trenutno, barem kod uređaja iole većih masa.

Pri nazivnoj struji koja teče nekim općim uređajem, uspostavlja se nakon isteka nekog vremena i konačna nadtemperatura, time uz specificiranu temperaturu okoline (najčešće +20 °C) i dopuštena temperatura uređaja. Ako je prethodno dugotrajnije opterećenje bilo manje od nazivnoga, postignuta temperatura uređaja bit će manja od dopuštene i to će bi-

[11] Primjerice, u trofazni elektromotor nazivne snage 1,5 kW, nazivnog napona 400 V, nazivnog faktora djelatne snage 0,85 i nazivnog stupnja djelovanja 0,9, pri nazivnom opterećenju na osovini, tekla bi svakim dovodnim vodičem struja od $1\,500/(\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}9) = 2{,}83$ A.

ti osnova za dopušteno preopterećenje određenog trajanja, za koje će temperatura uređaja porasti na dopuštenu vrijednost, pa je nakon isteka tog vremena važno staviti uređaj pod nazivno opterećenje ili opterećenje manje od nazivnoga, ili ga isključiti iz pogona.

Ako je dugotrajnija temperatura okoline manja od specificirane za nazivno opterećenje, primjerice –10 °C, tada će dopušteno preopterećenje biti posljedica veće razlike do dopuštene temperature, čak u i slučaju da je prethodno dugotrajnije opterećenje bilo jednako nazivnom.

No vrijedi i obrnuto; ako je dugotrajnija temperatura okoline veća od specificirane za nazivno opterećenje, recimo +40 °C, tada nije dopušteno niti nazivno opterećenje, nego sniženo opterećenje, podopterećenje.

Čitava priča o preopterećenju ima smisla za uređaje koje možemo promjenjivo opterećivati. Primjerice, električnu žarulju ili grijalicu ne možemo opterećivati raznoliko; ili su uključeni punom – dakle, nazivnom – snagom (naravno pri nazivnom naponu) ili su isključeni. Međutim, elektromotor, transformator ili generator možemo promjenjivo opterećivati.

Ako je riječ o više trošila zajedno, ukupno opterećenje tim trošilima je zbroj pojedinačnih opterećenja. Analogno, i o zbroju opterećenja pojedinačnih izvora u istom sustavu govorimo kao o ukupnom opterećenju tih izvora.

## Princip elektromotora i generatora

Za razumijevanje mnogih fizikalnih zbivanja u elektroenergetici, fundamentalno je načelno poznavanje djelovanja električnog generatora i elektromotora, jer su oni najvažniji među uređajima za proizvodnju električne energije (generatori) i za korištenje električnom energijom (elektromotori).

Princip elektromotora opišimo prema slici 2.14. U zračnom rasporu (mnogo užem nego što je, radi razumljivosti, prikazano slikom!), između polova nekog magneta (N = sjeverni pol, S = južni magnetski pol) položen je vodič koji može kliziti po električki vodljivim tračnicama. Te tračnice trebaju završavati strujnim krugom u kojem se nalazi izvor (istosmjernog) električnog napona. Stoga, tim strujnim krugom pa i klizajućim vodičem teče struja prikazana smjera. U tim prilikama – imamo vodič kojim teče struja u magnetskom polju – na vodič djeluje sila smjera kakav je prikazan na slici (ulijevo), čija je vrijednost (u njutnima):

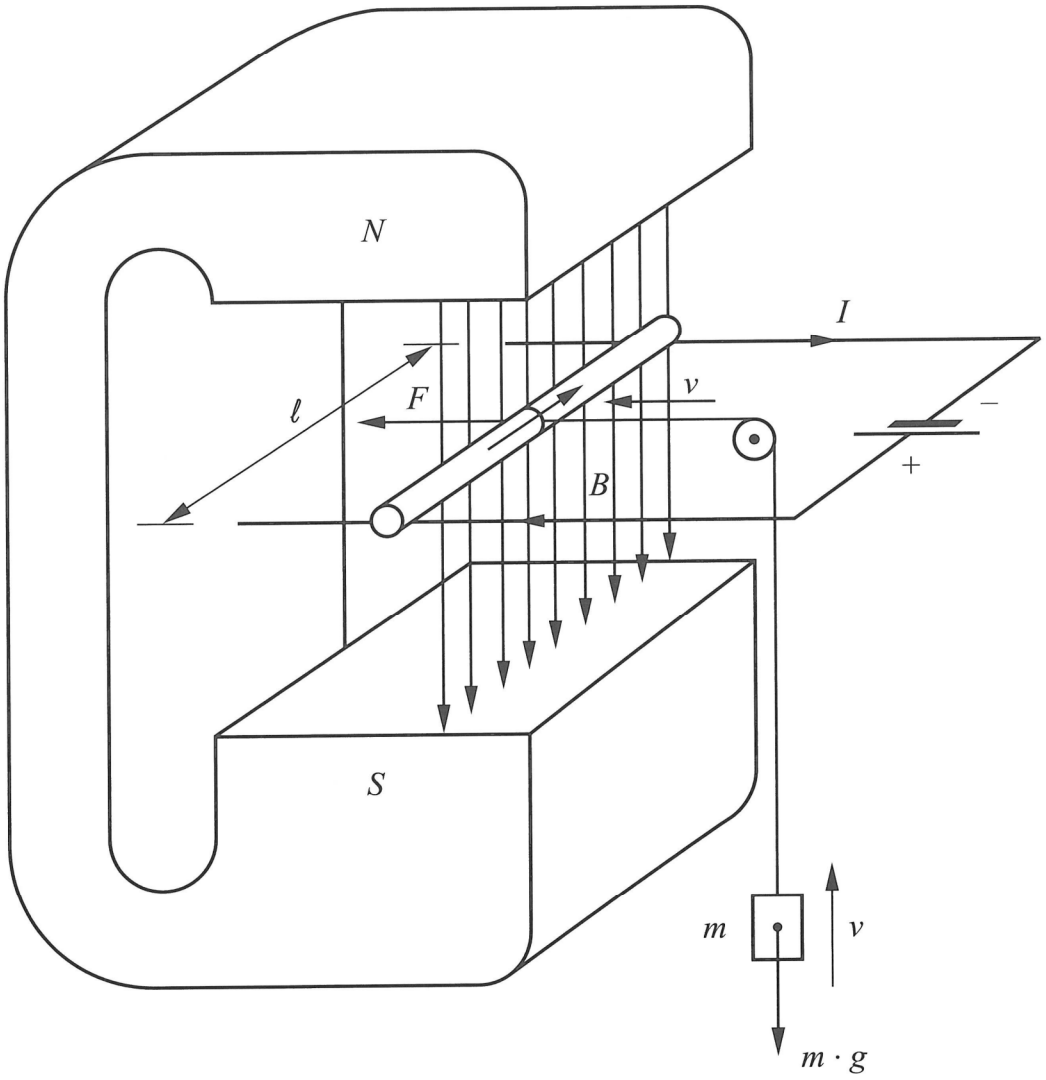
$$F = I \cdot B \cdot \ell \tag{2.35}$$

Tu su: $I$ = struja vodičem u amperima, $B$ = magnetska indukcija (gustoća magnetskog toka) u zračnom rasporu u teslama, $\ell$ = duljina vodiča u magnetskom polju, izložena djelovanju tog polja, u metrima.

Neka je na vodič pričvršćena uzica na koju je preko kotura pričvršćen uteg koji mehanički opterećuje vodič, silom težom. Ako bi ta sila bila u ravnoteži sa silom koja se javlja na vodič kojim protječe struja u magnetskom polju, vodič bi se kretao ulijevo jednolikom brzinom. Dizao bi uteg prema gore – dobili smo, načelno, elektromotor.

Ako je struja 1 A, magnetska indukcija 1 T, a duljina vodiča 1 m, tada bi sila na vodič bila jednaka upravo 1 njutn, sve dok vodič nailazi na magnetsko polje stalne gustoće, koje je predočeno na slici magnetskim silnicama između sjevernog i južnog magnetskog pola.

To je načelni prikaz električnog motora, u realnomu motoru se sila na vodič kojim protječe struja ostvaruje vodičem aksijalno pričvršćenim na osovinu rotora motora što uzrokuje

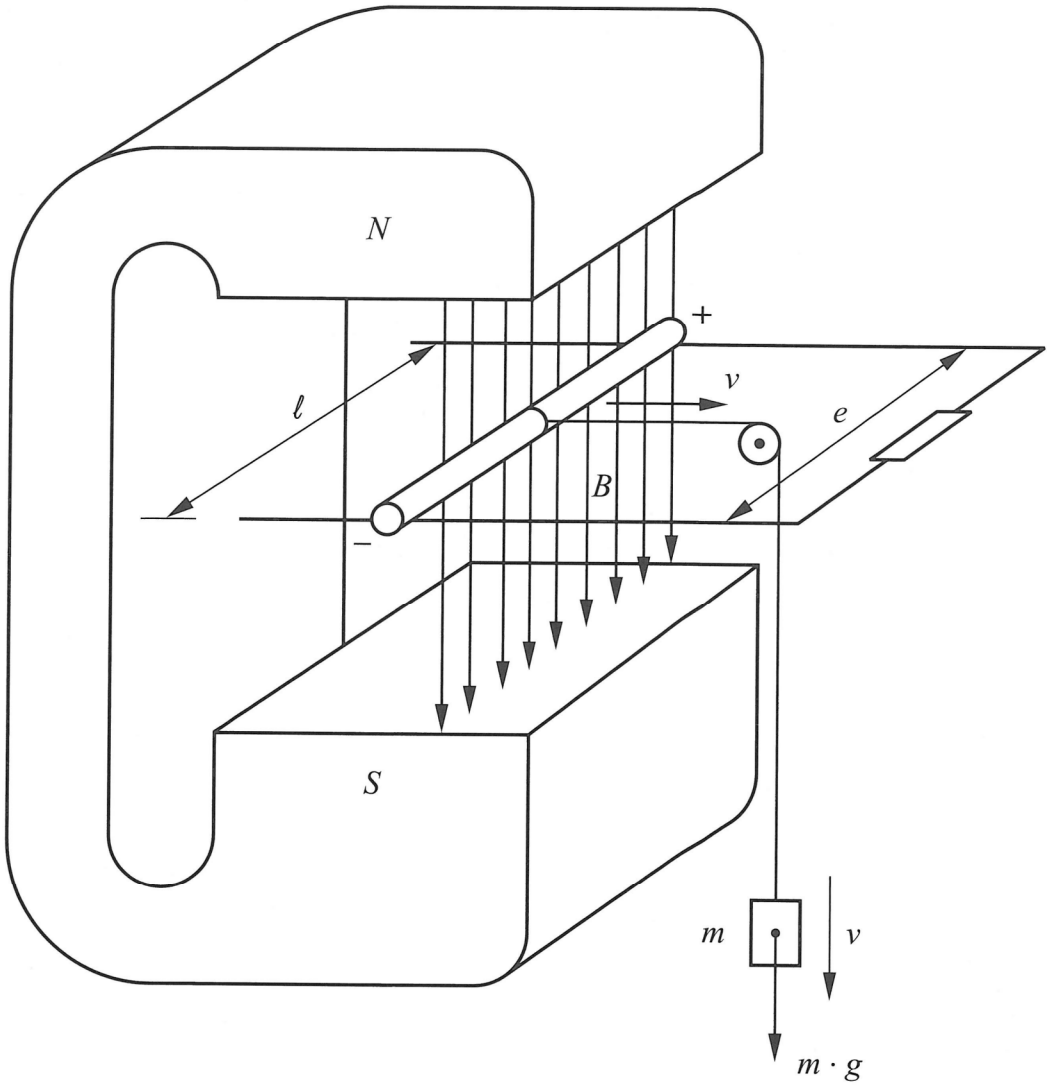



*Slika 2.14. Princip elektromotora: sila na vodič protjecan strujom u magnetskom polju*

zakretni moment te sile na osovini motora i vrtnju rotora. Na statoru motora, nalazi se magnet – ili elektromagnet – sa svojim polovima. (Jednako je moguća i varijanta elektromotora s vodičima na statoru a magnetom na rotoru.)

Opterećenje realnog motora mijenjamo kao da mijenjamo masu utega koji silom težom mehanički opterećuje vodič kojim teče struja. Dok je vodič u dijelu zračnog raspora gdje je indukcija $B$ nepromjenjiva – ako bismo povećali taj uteg, tada bi struja koju poteže motor od izvora električne energije trebala biti veća kako bi se zadržala ravnoteža ($I = F/(B \cdot \ell)$), da ne dođe do usporavanja vrtnje motora. To znači da se treba povećati i pretvorba u električnu energiju nekog izvora energije na ulazu u izvor električnog napona (primjerice povećanje pretvorbe kemijskog u električni oblik energije u bateriji ili akumulatoru, na koji je priključen taj elektromotor).

Princip električnog generatora opišimo prema slici 2.15. U zračnom rasporu (opet mnogo užem nego li je, radi razumljivosti, prikazano slikom!), između polova nekog magneta položen je vodič koji može kliziti po električki vodljivim tračnicama. Te tračnice mogu završavati zatvorenim strujnim krugom preko otpornika. Ako je na vodič pričvršćena uzica




*Slika 2.15. Princip električnog generatora i inducirani napon u vodiču koji se giba u magnetskom polju*

na koju je preko kotura pričvršćen uteg koji može slobodno padati pod djelovanjem sile teže, to će osigurati kretanje vodiča udesno. U tim prilikama, u vodiču će se inducirati (stvarati, proizvoditi, uspostaviti) električni napon, polariteta kakav je prikazan na slici. Ako bi gibanje bilo jednolikom brzinom, taj napon imao bi stalnu vrijednost (u voltima):

$$e = B \cdot \ell \cdot v \tag{2.36}$$

Tu su: $B$ = magnetska indukcija (gustoća magnetskog toka) u zračnom rasporu u teslama, $\ell$ = duljina vodiča koji se kreće u magnetskom polju, izložena djelovanju tog polja u metrima i $v$ = brzina kretanja vodiča u metrima u sekundi (m/s).

Ako je magnetska indukcija 1 T, duljina vodiča 1 m, a jednolika brzina 1 m/s, tada bi inducirani napon bio upravo jednak 1 volt, sve dok traje jednoliko kretanje tog vodiča u magnetskom polju stalne gustoće $B$, koje je prikazano na slici magnetskim silnicama između sjevernog i južnog magnetskog pola.

Ako bi bio priključen otpornik takvog otpora da ukupni otpor strujnog kruga (zajednički otpor otpornika, kliznih tračnica i vodiča koji se kreće) bude upravo 1 Ω, tada bi struja koja – pod djelovanjem induciranog napona – teče tim strujnim krugom, bila točno 1 amper (po Ohmovu zakonu: 1V/1Ω = 1A).

To je načelni prikaz električnog generatora, u realnomu generatoru se *sječenje* magnetskih silnica vodičem ostvaruje obično rotiranjem magneta na rotoru mirnim vodičima na statoru. Dakle, najčešće obrnuto nego li je prikazano na slici 2.15, ali se ostvaruju iste elektromagnetske okolnosti kao na tom načelnom prikazu.

U realnom generatoru obično je magnet izveden kao elektromagnet, kao namot namotan na željeznu jezgru. Istosmjernom strujom (*uzbudnom strujom*, kako se naziva ta struja) koja teče tim namotom, reguliramo vrijednost magnetske indukcije $B$ u zračnom rasporu. Time izravno reguliramo i vrijednost induciranog napona uz stalnu brzinu vrtnje generatora ($e = B \cdot \ell \cdot v$). Povećanjem ili smanjenjem uzbudne struje, djelujemo na povećanje ili sniženje napona generatora.

Konačno, nezaobilazna je priča koju smo prešutjeli pri tumačenju motora i generatora. Naime, u oba uređaja zbivaju se neraskidivo *istodobno obje pojave* koje smo opisali da se javljaju ili u motoru ili u generatoru.

U motoru, u kojem se giba vodič u magnetskom polju, postoje, dakako, potpuni uvjeti za induciranje napona u tom vodiču i to se doista i zbiva. Taj napon, čija je vrijednost $e = B \cdot \ell \cdot v$, drži ravnotežu s narinutim naponom iz izvora električnog napona (drugi Kirchhoffov zakon!) i ta je ravnoteža ispunjena samo ako se motor vrti jednolikom brzinom. Time će, kod povećanog mehaničkog opterećenja motora dakle težnje usporavanju vrtnje, biti povučena veća struja iz izvora kako bi se održala nužna naponska ravnoteža. A to vodi nepromijenjenoj brzini vrtnje motora.

Na primjeru načelnog motora sa slike 2.14, ako bi brzina bila 1 m/s, napon bi trebao biti 1 volt (jer je 1 T × 1 m × 1 m/s = 1V). Uz struju od 1 amper, motor bi mogao dizati teret čija je sila težine 1 njutn, dakle teret mase 0,102 kilograma (jer je $F = m \cdot g$, a akceleracija Zemljine teže $g = 9{,}81$ m/s$^2$). Povećamo li teret na dvostruki, struja se mora povećati na dvostruku vrijednost, dakle 2 ampera, kako bi ostala i dalje jednakost sile koja djeluje na vodič i sile teže, te ravnoteža narinutog i induciranog napona što se može ostvariti jedino zadržavanjem iste brzine.

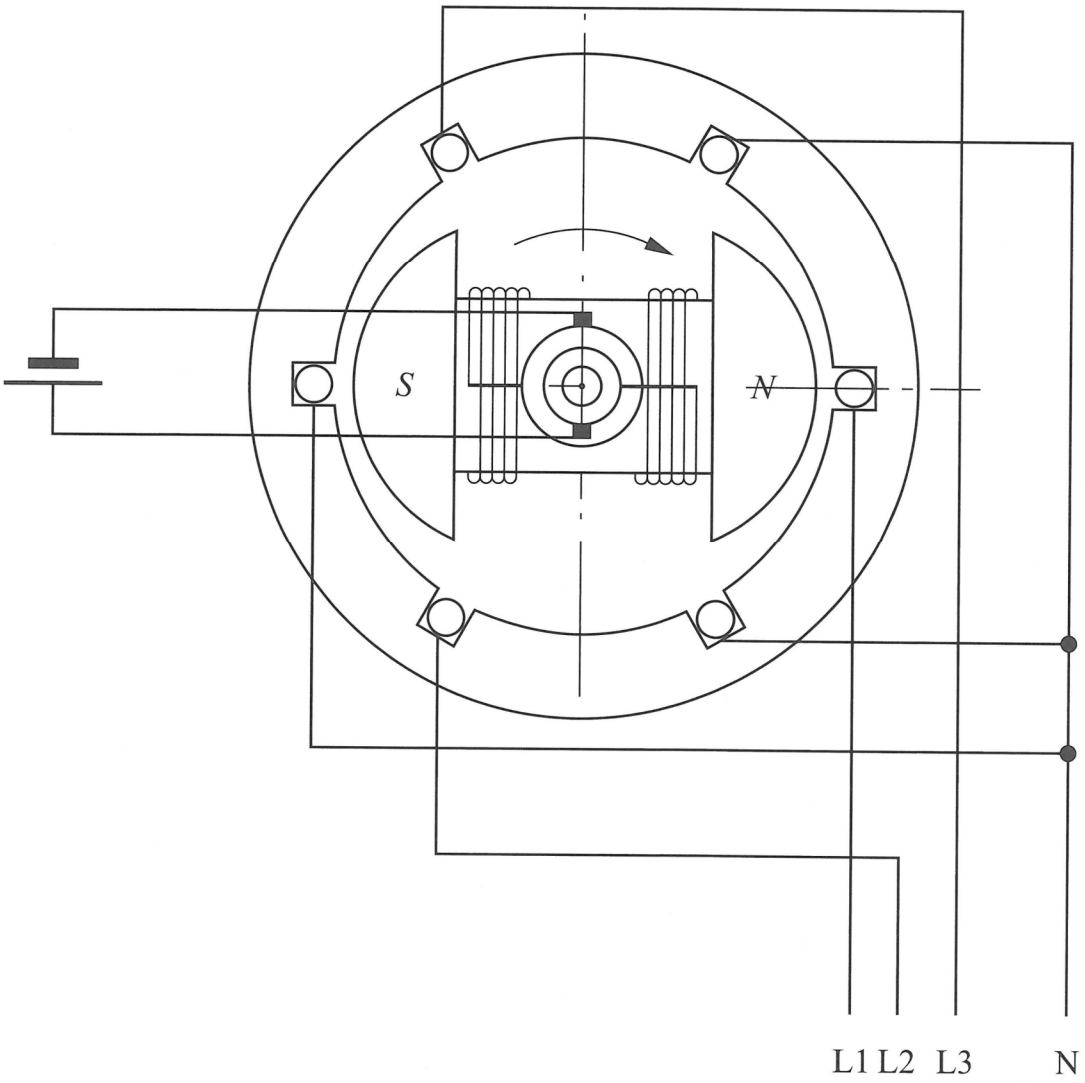
U generatoru pod opterećenjem, dakle uz zatvoren vanjski dio strujnog kruga kakvim otporom, u čijem se magnetskom polju nalazi vodič kojim protječe struja, postoje potpuni uvjeti za pojavu sile na taj vodič. Ta sila, čija je vrijednost $F = I \cdot B \cdot \ell$, drži ravnotežu sa silom težom kojom uteg poteže vodič u kretanju. Ako su te dvije sile u ravnoteži, vodič će se kretati jednolikom brzinom. Kod povećanog električnog opterećenja, dakle i povećane struje aktivnim vodičem, povećat će se i sila koja djeluje na vodič u magnetskom polju, što bi vodilo usporavanju vrtnje generatora. Za induciranje stalnog napona generatora $e = B \cdot \ell \cdot v$, potrebna je i stalna brzina vodiča pa stoga moramo povećati masu utega kako bismo to postigli.

Na primjeru načelnog generatora sa slike 2.15, uz brzinu od 1 m/s, inducirani napon bio bi 1 volt, kako je rečeno. Uz struju od 1 amper, vodič generatora bi se kretao tom brzinom, ako bi sila teže na uteg bila 1 njutn, dakle teret bi trebao biti mase 0,102 kilograma. Povećamo li struju na dvostruku, uteg se mora povećati na dvostruku vrijednost, dakle silu od dva njutna (ili masu od 0,204 kilograma), kako bi ostala i dalje ravnoteža sile koja djeluje na vodič u magnetskom polju i sile zatezanja uzice, što jedino može ostvariti zadržavanje iste brzine, pa time i istog induciranog napona u vodiču.

U realnom generatoru, trebalo bi povećati dakle mehanički moment kojim turbina djeluje na osovini generatora – u konačnici trebalo bi *dodati gas* na turbini kako bi sve skupa ostalo u ravnoteži. Dakle povećati dovođenje nositelja ulazne energije u turbinu (primjerice: snažnije izgaranje goriva u termoelektrani, što će povećati proizvodnju vodene pare koja pokreće turbinu).

Prikaz motorskog i generatorskog principa izveden je uz mnoga zanemarivanja (energetski najvažnije zanemarivanje: u numeričkim primjerima uzimali smo da se pretvorba energije u motoru i generatoru odvija bez gubitaka, što je nerealno – u najmanju ruku vodičima teče struja i javlja se neizbježno Jouleova toplina) i za prilike pri istosmjernoj struji. Za generatore i motore izmjenične struje, prilike se – u načelu – iste, samo složenije.

Ono što bi ipak trebalo istaknuti za generator izmjeničnog napona, sinusno ovisnog o vremenu, jest način na koji se to postiže. To se ostvaruje time što se magnetsko polje u zračnom rasporu generatora oblikuje tako da se magnetska indukcija u koju zalazi vodič pri vrtnji generatora, mijenja sinusno ovisno o položaju vodiča. Time će i inducirani napon u vodiču biti sinusno ovisan o vremenu.




*Slika 2.16. Trofazni generator (principijelni prikaz)*

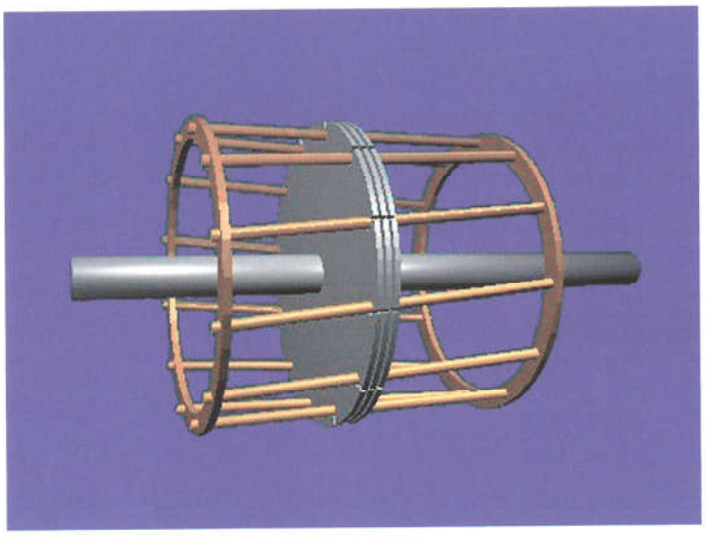
Dalje, ono što bi valjalo istaći za realne strojeve – to je potreba komutacije, primjenom kolektora, i primjena kliznih prstena.

Kolektor je sastavni dio istosmjernog stroja (generatora ili motora istosmjerne struje). Konstrukcijski se sastoji od odgovarajućeg broja lamela, međusobno izoliranih i mehanički čvrsto povezanih u rotacijsko tijelo. Postavljen je na osovini uz rotorski namot, čiji se počeci i krajevi pojedinih svitaka spajaju s kolektorskim lamelama, što u vrtnji, uz pomoć četkica položenih na kolektor i nepomičnih u odnosu na stator, omogućuje odvijanje komutacijskog procesa. Kolektor se, ponekad, naziva i komutator, jer omogućuje mijenjanje (*komutira*, odatle naziv) smjera struje koja teče vodičima rotorskog namota, tako da je taj smjer uvijek isti pod sjevernim, odnosno uvijek isti ali suprotan pod južnim magnetskim polom, čime se ostvaruje u svakom trenutku isti smjer sile na vodiče, a s tim u vezi i isti smjer vrtnje rotora stroja.

Klizni prsteni su dio rotacijskog stroja koji omogućuje stalni klizni spoj između mirne priključnice (četkice) koja se nalazi na statoru stroja i namota koji se vrti s rotorom stroja. Vodljivi klizni prsteni su mehanički učvršćeni na osovinu rotora, izolirani međusobno i od osovine, a na njih su priključeni početak i kraj rotorskog namota; četkice koje kližu po prstenima nalaze se na statoru te omogućuju trajni električki spoj s rotorskim namotom bez obzira na vrtnju rotora. To omogućuje trajni klizni spoj primjerice namota elektromagneta na rotoru stroja s vanjskim izvorom uzbudne struje, kao na načelnom prikazu trofaznoga generatora, slika 2.16.

*Asinkroni, indukcijski motor* izmjenične struje ne treba niti kolektora niti kliznih prstena; na stator se priključuje izmjenični napon, koji uspostavlja okretno magnetsko polje a u rotoru se induciraju struje u kratko spojenom vodljivom kavezu, koji je sa statorom samo u elektromagnetskoj vezi (slika 2.17)!

*Linearni motor* ostvaruje linijsko kretanje bez posredovanja mehanizma koji rotacijsko kretanje pretvara u pravocrtno. Takva preobrazba vrtnje u linijski hod zapravo je vrlo često potrebna, svako vozilo u konačnici je takvo. Linearni motori načelno su riješeni na način prikazan na slici 2.14. Ako se na stacionarnoj stazi nalaze vodiči kojima teče struja a na pokretnoj jedinici magnet, protusila će pokretati magnet u linijsko kretanje.

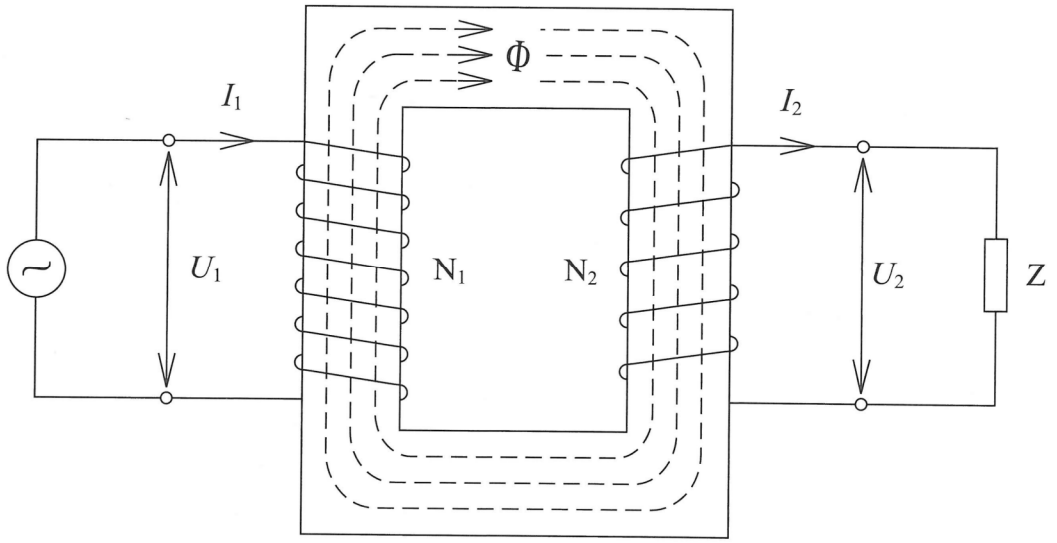


*Slika 2.17. Kratkospojeni kavez na rotoru asinkronog elektromotora*

# Princip transformatora

U elektroenergetskim mrežama i u brojnim trošilima električne energije izmjenične struje, primjena električnih transformatora toliko je uobičajena i doista mnogobrojna da se naprosto nameće potreba uvodnog tumačenja principa na kojem se temelji i njihovo funkcioniranje. Transformator je statički uređaj (nema okretnih elektromehaničkih dijelova!) za elektromagnetsku pretvorbu električne energije pri jednom naponu u električnu energiju pri drugom naponu.

Protumačit ćemo princip transformatora na primjeru najjednostavnijeg, jednofaznog, dvonamotnog transformatora koji se sastoji od jezgre od feromagnetskog materijala (za koji je karakteristična njegova visoka magnetska vodljivost, doduše nelinearno ovisna o stupnju magnetiziranja ali barem tisuću puta veća od magnetske vodljivosti zraka – u području do magnetskog zasićenja) i dva namota, primarnog i sekundarnog. Namoti načelno imaju različite brojeve zavoja; neka primarni namot ima $N_1$ zavoja a sekundarni $N_2$ zavoja, slika 2.18.




*Slika 2.18. Jednofazni transformator*

Priključi li se primarni namot na izvor sinusnog izmjeničnog napona, tada zavojima tog namota teče izmjenična struja magnetiziranja koja uspostavi u jezgri izmjenični magnetski tok toliko velik da u svakom zavoju inducira toliki napon da zboj tih napona u svim zavojima $N_1$ bude jednak upravo narinutom naponu (drugi Kirchhoffov zakon!). Taj napon inducira se prema Faradayevu zakonu elektromagnetske indukcije koji kaže da je inducirani napon u jednom zavoju jednak brzini vremenske promjene magnetskog toka obuhvaćena tim zavojem. Taj magnetski tok mora se mijenjati sinusno ovisno o vremenu kako bi i inducirani napon bio sinusno ovisan o vremenu, baš kao i narinuti napon[12].

[12] Posve točno iskazavši Faradayev zakon elektromagnetske indukcije, inducirani napon u zavoju negativna je vrijedost derivacije magnetskog toka $\Phi$ po vremenu, dakle $u = -\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t$. Ako je magnetski tok sinusno ovisan o vremenu, tipa $\Phi = A \cdot \sin at$, tada je $\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t = a \cdot A \cdot \cos at$, dakle derivacija je kosinusna vremenska funkcija. Međutim, znano je da je kosinusna funkcija zapravo za četvrtinu periode vremenski pomaknuta sinusna funkcija. Dakle, uz sinusni oblik vremenske promjene magnetskog toka i vremenski oblik induciranog napona je sinusan.

Ako je inducirani napon u jednom zavoju $u$, ukupni napon koji se inducira u primarnom namotu je $N_1$ puta veći

$$U_1 = N_1 \cdot u \tag{2.37}$$

Međutim, taj promjenjivi magnetski tok obuhvaćaju i zavoji sekundarnog namota $N_2$, te se i u svakom od tih zavoja inducira isti napon $u$ kao i u svakom zavoju primarnog namota. Stoga je

$$U_2 = N_2 \cdot u \tag{2.38}$$

Diobom tih relacija, (2.37) i (2.38), dolazimo do osnovne transformatorske jednadžbe

$$U_1 / U_2 = N_1 / N_2 \tag{2.39}$$

koja kaže da je omjer primarnog i sekundarnog napona jednak omjeru broja zavoja primarnog i sekundarnog namota.

Priključimo li na sekundarni namot kakvo trošilo, teći će sekundarnim krugom struja jednaka omjeru sekundarnog napona i impedancije trošila (Ohmov zakon!). Ta bi struja tvorila magnetski tok u jezgri transformatora suprotan izvornom magnetskom toku (*reakcija je jednaka a suprotna akciji*) što bi vodilo sniženju tog izvornog toka i time sniženju induciranog napona u primarnom namotu, to većem što je sekundarna struja veća. To bi vodilo neravnoteži narinutog i primarno induciranog napona, što nije održivo, pa će se struja primarnim namotom povećati toliko da se uspostavi rezultantni magnetski tok potreban upravo za induciranje odgovarajućeg primarno induciranog napona (jednakog narinutom naponu). Dobili smo transformaciju električne snage: koliko se mijenja izlazna snaga iz transformatora – toliko se mijenja i ulazna snaga.

Zanemarivši gubitke snage u takvom, idealnom, transformatoru, odnosno struju magnetiziranja (koja je reda veličine jedan posto nazivne primarne struje), a primjenivši zakon o očuvanju energije, tvrdimo da je ulazna snaga jednaka izlaznoj

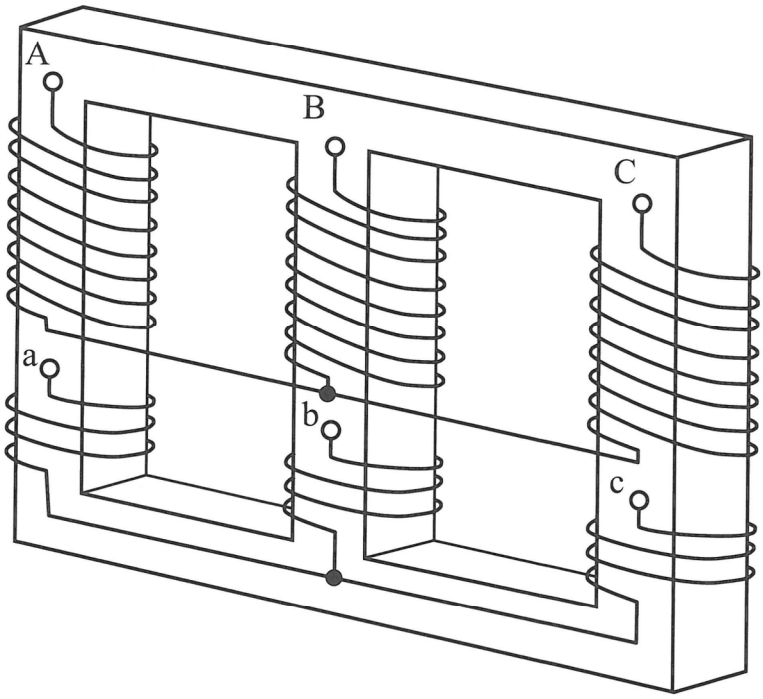
$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \tag{2.40}$$

iz čega slijedi omjer

$$U_1 / U_2 = I_2 / I_1 \tag{2.41}$$

Dakle, primarni i sekundarni napon odnose se kao sekundarna i primarna struja. Što je napon jednog namota veći, to je struja tim namotom manja! Namot s više zavoja bit će namotan tanjom žicom, a namot s manje zavoja bit će namotan debljom žicom, pretpostavi li se jednaka dopuštena gustoća struje u oba namota.

U trofaznim električnim mrežama za transformaciju primjenjuje se u svakoj fazi jedan jedofazni transformator, te će slog takva tri transformatora tvoriti jednu trofaznu jedinicu (tako se postupa u Americi) ili će se primjenjivati trofazni transformatori (kako se postupa u Europi), slika 2.19. Primjena jednofaznih jedinica u trofaznom slogu vodi jeftinijoj rezervi,




*Slika 2.19. Trofazni transformator*

jer je dovoljan jedan jednofazni rezervni transformator (pa ukupna instalirana snaga zajedno s rezervom iznosi 133 posto potrebne snage). Ako je primjenjen trofazni transformator a želi se postići jednaka rezerva, dakle da se zastoj jedne jedinice može naknaditi rezervom, morat će se instalirati ukupno 200 posto potrebne snage.

Fazni namoti trofaznih transformatora mogu biti spojeni u zvijezdu (tako je prikazano na slici 2.19) ili u trokut, a mogu se namoti jedne faze razložiti u dva podnamota, smještena na susjedne stupove jezgre transformatora i ti podnamoti spojiti u tzv. cik-cak spoj. Pri tome su moguće razne kombinacije spoja primarnih i spoja sekundarnih namota jednog trofaznog transformatora.

Transformatori mogu biti izvedeni i kao autotransformatori (kod kojih se izvod nižeg napona tvori na odgovarajućem mjestu višenaponskog, ujedno i jedinog, namota) te kao tronamotni transformatori (sadrže primarni, sekundarni i tercijarni namot).

Nazivna struja transformatora određuje se iz nazivne snage $S_n$ i nazivnog napona $U_n$:

$$I_n = S_n / (\sqrt{3} \cdot U_n) \qquad (2.42)$$

Nazivna struja na primarnoj strani određuje se uvrštavanjem primarnog nazivnog napona u (2.42), a nazivna struja na sekundarnoj strani – uvrštavanjem sekundarnog nazivnog napona.

Relacija (2.42) služi za određivanje nazivne struje bilo kakva trofaznog uređaja poznavanjem njegove nazivne snage i nazivnog međufaznog napona. Radi li se o jednofaznom uređaju, treba izostaviti $\sqrt{3}$ u nazivniku.

# 3

# Energetika svijeta početkom trećeg tisućljeća

Kretanja u posljednjih trideset godina u svijetu, od svjetske energetske krize do danas, prikazat ćemo podacima kako ih donosi Međunarodna agencija za energiju, IEA[13]. Izaberimo samo one podatke koji se odnose na *ukupnu potrošnju prirodnih oblika energije* (TPES, Total Primary Energy Supply), na udio energije iskorišten za proizvodnju električne energije u ukupnoj potrošnji prirodnih oblika energije te na ukupnu *neposrednu energetsku potrošnju* (TFC, Total Final Consumption) i na električni udio u toj neposrednoj potrošnji (TEC, Total Electricity Consumption). Neposredna energetska potrošnja, utvrđuje se tako da se od ukupne potrošnje prirodnih oblika energije odbije neenergetska potrošnja (non-energy use), *vlastita potrošnja* (own use) energije energetskog gospodarstva i *gubici energije* pri pretvorbama oblika energije (energy transformation losses) te pri njezinu prijenosu i distribuciji (transmission and distribution losses).

## Svjetska kretanja

U svijetu, gdje danas živi preko šest milijarda ljudi (2003. godine: 6 268 milijuna) i u kojem se čak 1,6 milijarda ljudi ne služi blagodatima električne energije, a oko 800 milijuna ljudi ide gladno na počinak, posljednjih su se trideset godina zbile doista dramatične promjene u pogledu energetske opskrbe. Dok se u razdoblju od Drugog svjetskog rata do energetske krize (1950–1973) svakih 14 godina udvostručivala ukupna potrošnja prirodnih oblika energije, za posljednjih 30 godina od tada ta se potrošnja povećala samo 1,75 puta (1973–2003). To je znatno postignuće svjetske energetike, nakon signala o energetskoj ograničenosti i ograničenosti svekolikih prirodnih resursa[14], koji su kulminirali 1973. a ponovili se još 1979. godine, kada je došlo do umnogostručenja svjetskih cijena sirove nafte. Inače, u svijetu je 2003. godine ukupno utrošeno okruglo oko 10 tisuća milijuna tona ekvivalentne nafte (točno: 10 579 Mtoe) prirodnih oblika energije, dakle prosječno oko 1,7 tona ekvivalentne nafte po stanovniku svijeta.

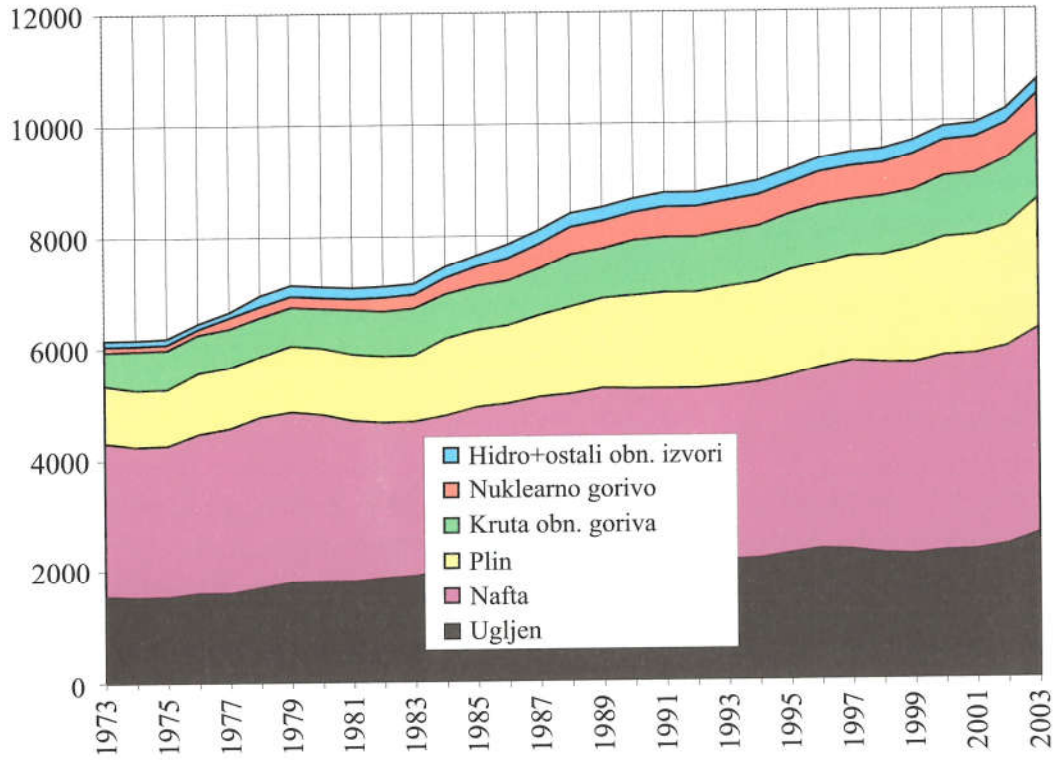
Zemlje OECD-a[15] u tom uspjehu participirale su i nešto više. U tim zemljama ostvareno je još umjerenije povećanje ukupne potrošnje prirodnih oblika energije u istom razdoblju: 1,43 puta (1973–2003). Ima li se na umu da je njihov udio u svjetskoj potrošnji prirodnih oblika energije oko polovina (točno 51 posto, 2003), a udio u svjetskom stanovništvu nešto preko jedne šestine (točno 18,4 posto, 2003), onda se dade zaključiti da – doduše presporo

[13] Svi svjetski podaci iznose se ovdje prema *Key World Energy Statistics 2005, IEA* (IEA = International Energy Agency, Međunarodna agencija za energiju).

[14] Preostale svjetske rezerve fosilnih i nuklearnih goriva smanjuju se iskorištavanjem, a povećavaju tehnološkim napretkom pri njihovu iskorištavanju, povećanjem podnošljive cijene njihova pridobivanja i otkrivanjem novih nalazišta. Prema izvješću *Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe* iz 2005. godine, preostale svjetske poznate i iskoristive rezerve ugljena trajale bi oko 175 godina, nafte oko 42 godine, plina oko 63 godine i urana 50 godina, uz sadašnje njihovo godišnje iskorištavanje i sadašnji način tog korištenja. Dodatni resursi tih goriva (tehnički i/ili ekonomski danas neiskoristivi ali geološki vjerojatni), pet puta su veći od danas poznatih i iskoristivih rezerva, a te današnje rezerve cijene se na ukupno 890 tisuća Mtoe.

[15] OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) obuhvaća 30 razvijenijih zemalja svijeta: Australiju, Austriju, Belgiju, Kanadu, Češku, Dansku, Finsku, Francusku, Njemačku, Grčku, Mađarsku, Island, Republiku Irsku, Italiju, Japan, Koreju, Luksemburg, Meksiko, Nizozemsku, Novi Zeland, Norvešku, Poljsku, Portugal, Slovačku, Španjolsku, Švedsku, Švicarsku, Tursku, Ujedinjeno Kraljevstvo i Sjedinjene Američke Države.

i preslabo – raste spoznaja razvijenoga svijeta o potrebi i nužnosti umjerenije svekolike potrošnje u korist zemalja u razvoju i nerazvijenih. (Udio OECD-a u ukupnoj potrošnji prirodnih oblika energije svijeta 1973. godine bio je 62 posto). Najveći doprinos susprezanju u potrošnji, odnosno efikasnijem iskorištenju energije dale su zapadnoeuropske razvijene zemlje, dok su neeuropske zemlje OECD-a povećale svoj udio unutar OECD-a.

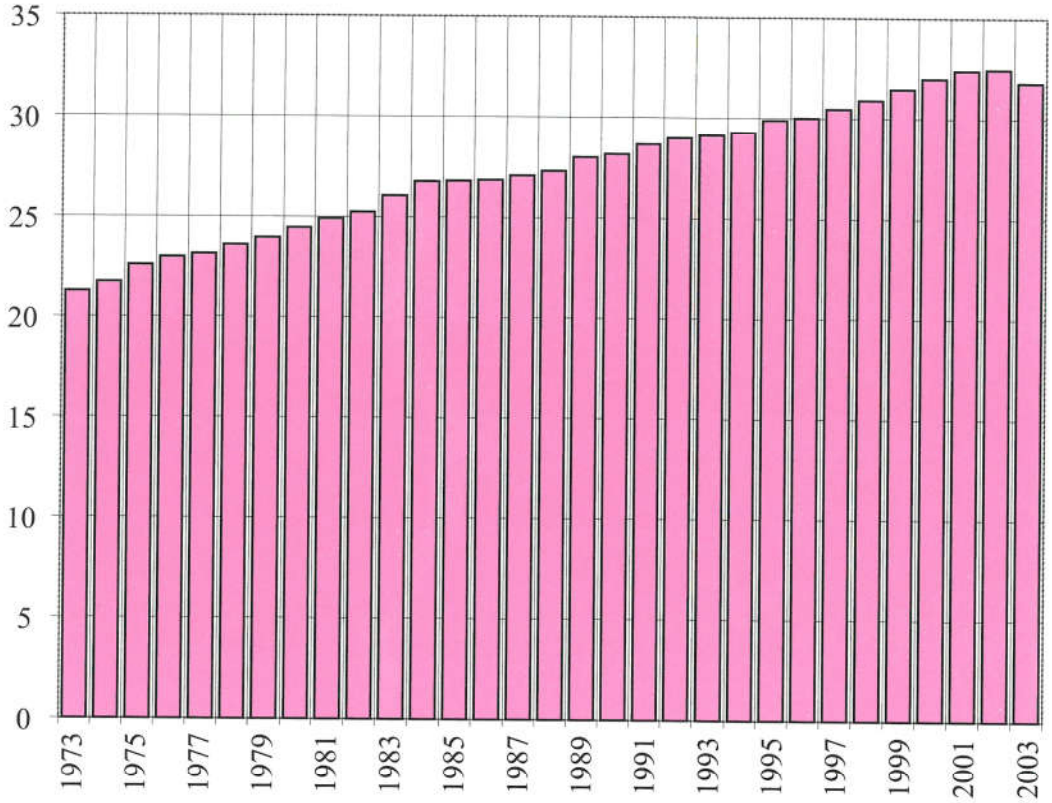



*Izvor: IEA-Key World Statistics 2005*

*Slika 3.1. Ukupna potrošnja prirodnih oblika energije u svijetu* (Mtoe)

Udio nafte u energetskoj opskrbi svijeta smanjen je doista drastično, s 45 posto kolik je taj udio bio 1973. godine, smanjen je na 34,4 posto u 2003. godini (slika 3.1). Na račun – uglavnom – ostvarenog gotovo nevjerojatnog povećanja udjela korištenja nuklearnim gorivom, s 0,9 posto na početku tog razdoblja povećao se taj udio na 6,5 posto krajem tog razdoblja, te povećanja udjela korištenja prirodnim plinom s 16,2 posto na 21,2 posto. Proizvodnja je električne energije iz nuklearnih elektrana u tom razdoblju povećana 13 puta! Korištenje ugljenom praktički je ostalo na približno 1/4 udjela u energetskoj opskrbi svijeta, korištenje vodnim snagama nešto se povećalo (s 1,8 posto na 2,2 posto, više je nego udvostručena proizvodnja električne energije iz hidroelektrana), a korištenje obnovljivim gorivima (dijelom, karakteristično za nerazvijeni dio svijeta; životinjski ekskrement, slama, razno suho bilje, ogrjevno drvo i otpad, kućni, komunalni i industrijski) ostalo je na istoj razini, oko 11 posto. Konačno, značajno je uvećan – doduše apsolutno malen – udio korištenja ostalim obnovljivim izvorima: geotermalnom, Sunčevom i energijom vjetra, s 0,1 posto porastao je na 0,5 posto.

Udio energije za proizvodnju električne energije u ukupnoj potrošnji prirodnih oblika energije u svijetu znatno je porastao, dakako. Dok se 1973. godine gotovo svaki četvrti džul prirodnih oblika energije u svijetu preobrazio u električni oblik, 2003. godine to se događa sa *svakim trećim džulom*! Ili, točnije, taj udio je bio 21,3 posto (1973) da bi porastao na oko 32 posto na prijelazu milenija (slika 3.2).



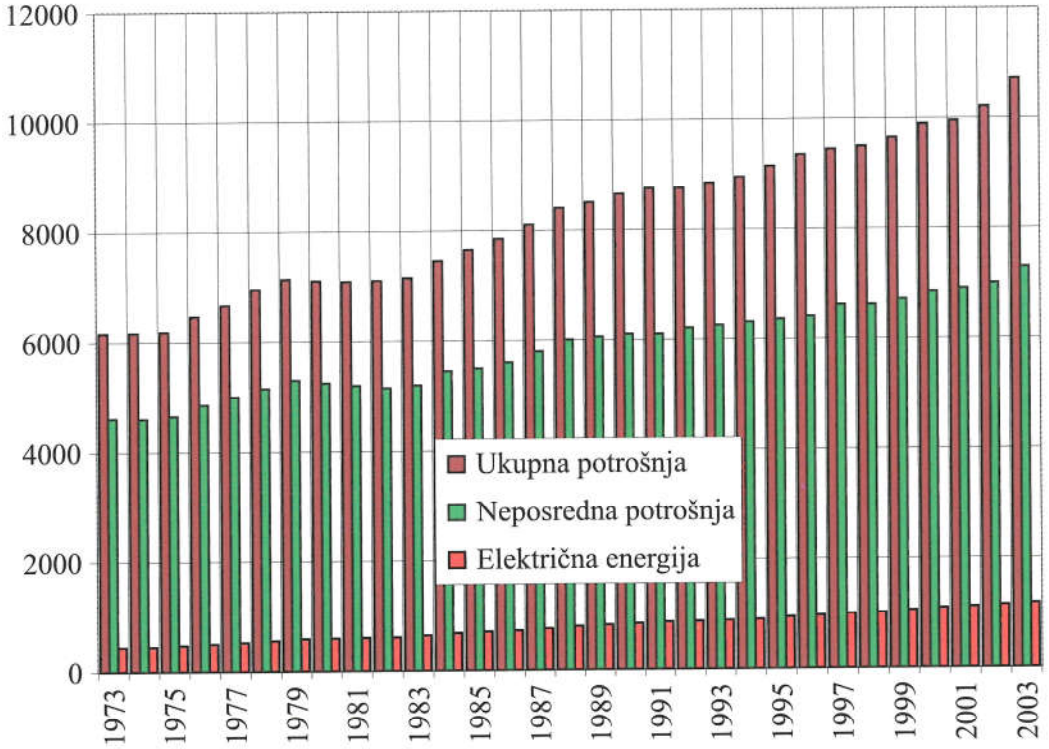

*Izvor: IEA-Key World Statistics 2005*

*Slika 3.2. Udio energije za proizvodnju električne energije u ukupnoj potrošnji prirodnih oblika energije u svijetu (%)*

U ukupnoj neposrednoj energetskoj potrošnji u svijetu došlo je do povećanja od 1,58 puta (1973–2003), (slika 3.3). Dakle, više se povećala potrošnja prirodnih oblika od neposredno potrošene energije, došlo je do pogoršanja totalnog stupnja djelovanja[16] svjetskog energetskog sustava (s oko 76 posto pao je na 69 posto). Dakle, više se posezalo – u prosjeku – za neefikasnijim energetskim rješenjima nego li za efikasnijim, usprkos neprestanim nastojanjima. Udio se električne energije u neposrednoj potrošnji energije svijeta povećao s 9,5 posto (1973) na 16,1 posto (2003) i to je *najveća strukturna promjena u neposrednoj potrošnji* u tom razdoblju (slika 3.4[17])! Kako je prosječni stupanj djelovanja

[16] Totalni stupanj djelovanja energetike je omjer ukupne neposredne potrošnje energije, dakle energije koja je *izašla* iz energetskog sektora, i ukupne potrošnje prirodnih oblika energije, dakle energije koja je *ušla* u energetski sektor.

[17] Ta je slika prikazana uz različite vremenske obuhvate, već prema raspoloživosti podataka za svijet, za EU-25 i za Hrvatsku.



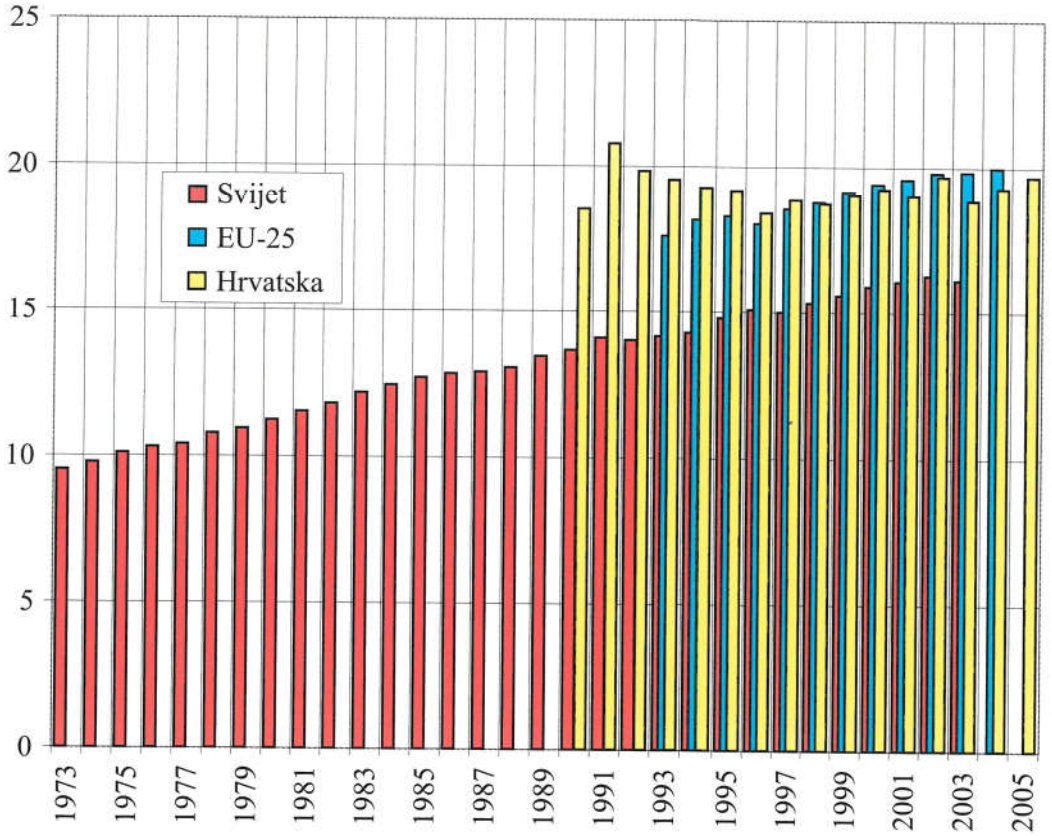

*Izvor: IEA-Key World Statistics 2005*

*Slika 3.3. Ukupna potrošnja prirodnih oblika energije, neposredna potrošnja svih oblika energije i netopotrošnja električne energije u svijetu* (Mtoe)

pretvorbe prirodnih oblika energije u električni oblik još uvijek vrlo nepovoljan (približno 35 posto), takvo je povećanje udjela električne energije u neposredno potrošenoj energiji nužno dovelo do smanjenja totalnog stupnja djelovanja svjetske energetike. Udio se derivata nafte smanjio s 47 posto na 43 posto. Najveći je udio naftnih derivata – u svim neposrednim oblicima, jer još nije došlo do radikalne supstitucije derivata nafte drugim oblicima energije, u cestovnom, brodskom i avionskom prometu. Udio se ugljena također smanjio, s 13,4 posto (1973) pao je na 7,4 posto (2003), što je ekološki dakako privlačno. Udio se plina nije bitno promijenio u neposrednom korištenju, s 14,6 posto narastao je na 16,4 posto. Očigledno je plin naglašenije korišten u elektranama, što je ekološki privlačno ali energetski nije primjereno rješenje, jer se plin može – bez pretvorbe u električnu energiju – bolje iskoristiti za neposredno izgaranje u ložištima kao izvor topline. Tehnološke i životne potrebe čovječanstva za toplinom su preko 50 posto neposredno iskorištene energije i plin je najefikasnije tu usmjeravati.

Ostvarenja u proizvodnji električne energije su najdojmljivija. Dok se korištenje svekolikom energijom povećalo – kako je već rečeno – 1,75 puta, a neposredno iskorištene energije 1,58 puta, u istom razdoblju (1973–2003) povećanje proizvodnje električne energije ostvarilo se 2,73 puta! Ukupna svjetska brutoproizvodnja na prijelazu milenija (2003) je 16 661 teravatsat (slika 3.5)!

Zanimljivo je dodati da je ukupna svjetska proizvodnja električne energije 1950. godine bila samo oko 1 000 teravatsati – za 50 godina proizvodnja električne energije u svijetu je *ušesnaesterostručena*!



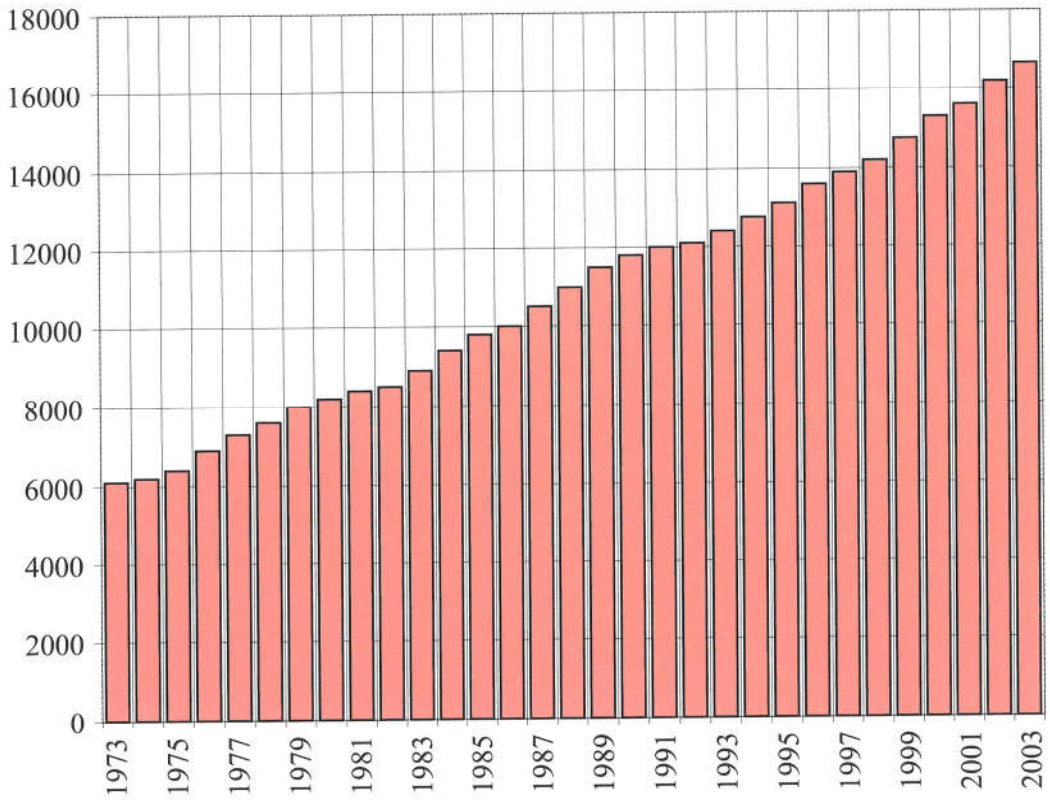

*Izvor: IEA-Key World Statistics 2005, Eurostat, EIHP*

*Slika 3.4. Udjeli električne energije u neposrednoj potrošnji energije (%)*

U svijetu je neposredna godišnja potrošnja električne energije bila 2003. godine 13 660 TWh, pa je prosječna godišnja neposredna potrošnja električne energije po stanovniku nešto manje od 2 200 kWh (2003), u zemljama OECD to je nešto više od 8 000 kWh, a u Aziji bez bivšeg SSSR-a, Bliskog istoka i Kine 585 kWh, te u Africi 518 kilovatsati. U zemljama Europske Unije to je bilo prosječno oko 5 300 kWh.

Kako je svjetska brutoproizvodnja električne energije (2003) bila 16 661 teravatsat, a neposredna potrošnja 13 660 TWh, izlazi da su gubici u mrežama te vlastita potrošnja u elektranama i mrežama bili 3 000 teravatsati – to je jednako godišnjoj brutoproizvodnji svih elektrana u Europskoj Uniji. Gotovo nevjerojatno, ali istinito: sve europske elektrane trebale bi se *vrtjeti* samo da namire gubitke u mrežama i vlastitu potrošnju u svim svjetskim elektranama i mrežama!

Stupanj opterećenja okoliša zbog energetskih djelatnosti ilustrirajmo samo godišnjom emisijom ugljikova dioksida po stanovniku iz sektora energetike. Za svijet u cjelini to iznosi oko 4 tone po stanovniku, za zemlje OECD oko 11 tona, a za zemlje Azije (bez već spomenutih zemalja) i za zemlje Afrike to je oko 1 tona ugljikova dioksida po stanovniku! Dakle 11 puta se više godišnje emitira ugljikova dioksida po svakom stanovniku razvijenih zemalja od prosječne emisije po stanovniku nerazvijenih!




*Izvor: IEA-Key World Statistics 2005*

*Slika 3.5. Brutoproizvodnja električne energije u svijetu* (TWh)

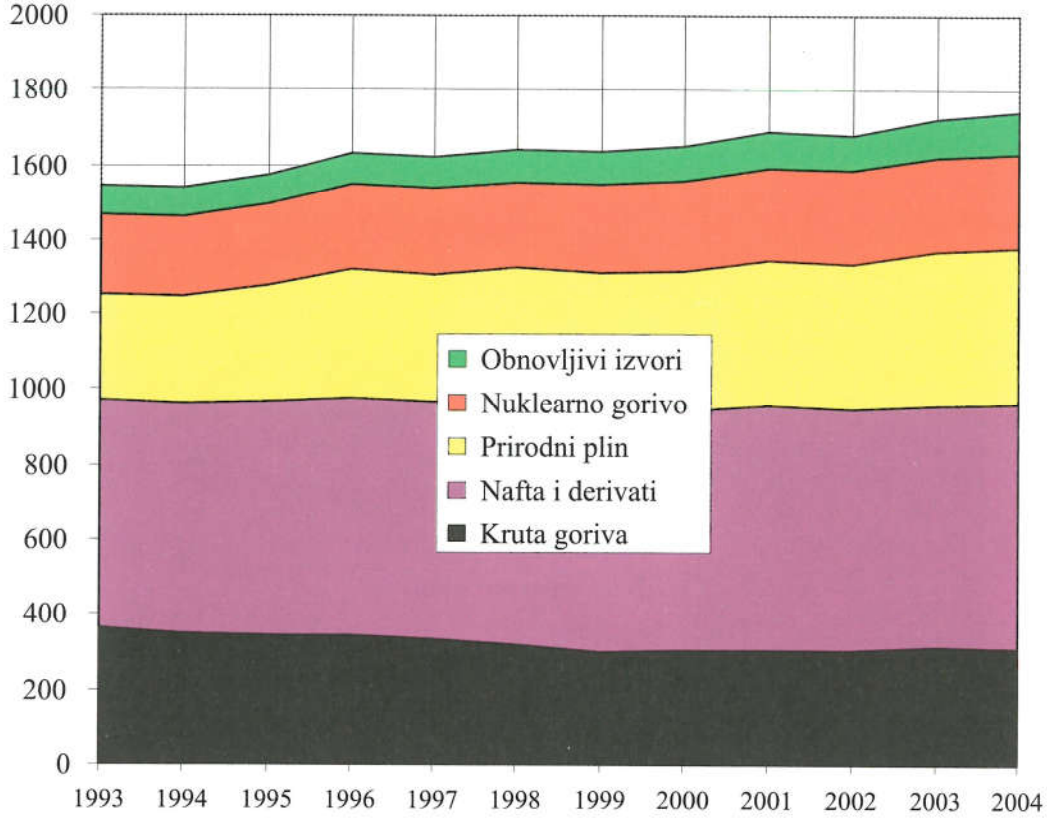
## Kretanja u Europskoj Uniji

Zanimljivija su nam svakako kretanja u neposrednijoj okolini, u Europi. Ona su nam svakako važnija od svjetskih, jer određuju smjer s kojim bismo se mi utemeljenije uspoređivali. Kretanja u posljednjem desetljeću u Europskoj Uniji[18], prikazat ćemo podacima za razdoblje 1993-2004 kako ih donosi Eurostat[19], agencija za službenu statistiku Europske Unije. Naime za to razdoblje raspolaže se s podacima za svih 25 članica, jer – kako je poznato – do 2004. godine Europska Unija imala je 15 članica, te je podatke za svih 25 članica trebalo izračunavati *unatrag* i to je učinjeno za 10 prethodnih godina, od 1993. godine. Početkom 2007. godine u punopravno članstvo primljene su Bugarska i Rumunjska, pa će se statistika morati opet tome prilagođavati.

U Europskoj Uniji od 25 članica (EU-25) živjelo je oko 460 milijuna stanovnika (točno: 459 milijuna, prema procjeni za 2004. godinu); Europska Unija sudjeluje s oko 7,3 posto u svjetskom stanovništvu. U promatranom razdoblju potrošnja se prirodnih oblika energije u

[18] Europska Unija, zajednica europskih država koja od 1. svibnja 2004. godine obuhvaća (kratica za takav sastav Unije je EU-25) i: Cipar, Češku, Estoniju, Latviju, Litvu, Mađarsku, Maltu, Poljsku, Slovačku i Sloveniju, a do te godine obuhvaćala je: Austriju, Belgiju, Dansku, Finsku, Francusku, Grčku, Irsku, Italiju, Luksemburg, Nizozemsku, Njemačku, Portugal, Španjolsku, Švedsku i Ujedinjeno Kraljevstvo. Kratica za takav suženi sastav Unije je EU-15. Od 1. siječnja 2007. godine, članice su i Bugarska i Rumunjska, te je kratica EU-27.

[19] Eurostat, epp.eurostat.ec.europa.eu/19.2.2007.



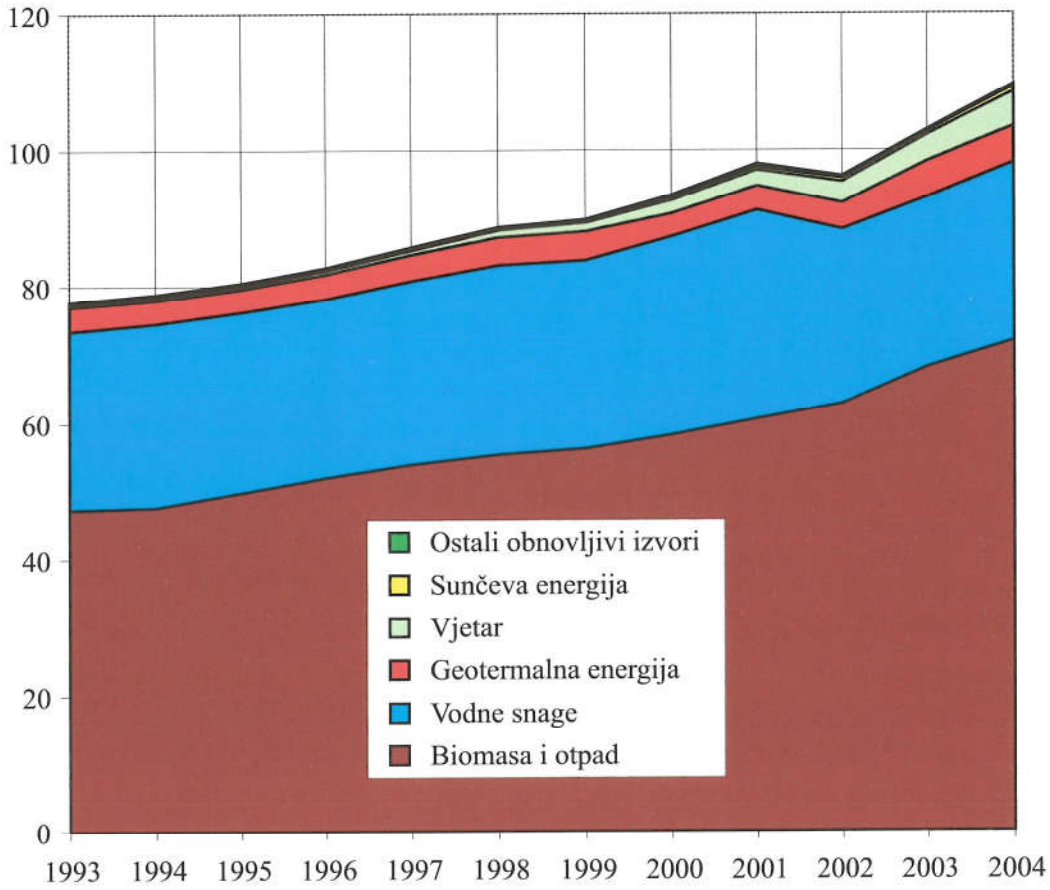

*Izvor: Eurostat*

*Slika 3.6. Ukupna potrošnja prirodnih oblika energije u EU-25* (Mtoe)

Europskoj Uniji povećala s 1 567 Mtoe na 1 744 Mtoe (1993–2004). Udio Europske Unije u potrošnji prirodnih oblika energije svijeta smanjio se sa 17,8 posto (1993) na 16,3 posto (2003). To je znatno; s jedne strane Europska Unija koristi se energijom sve razumnije, a s druge strane ipak se nerazvijeniji svijet razvija nešto brže, nadajmo se i dovoljno razumno. U Europskoj Uniji 2004. godine utrošeno je prosječno oko 3,8 tona ekvivalentne nafte prirodnih oblika energije po stanovniku, dakle ipak 2,2 puta više nego li što je u prosjeku potrošio stanovnik čitava svijeta.

Udio nafte u energetskoj opskrbi Europske Unije (slika 3.6) u promatranom razdoblju smanjen je, s 39,4 posto (1993) na 37,3 posto (2004), ali je ostao nešto viši nego što je taj udio u svijetu. Udio potrošnje krutih goriva je znatnije smanjen: s 23,4 posto (1993) pao je 17,9 posto (2004), niži je od svjetskoga. Ekološki je privlačnije korištenje prirodnim plinom, pitanje je samo rizičnosti sve veće dobave iz Rusije. Povećanje udjela prirodnog plina je veliko: s 18,3 posto (1993) na 24 posto (2004). Dakle, plin je nadoknadio u potpunosti smanjenje korištenja krutim i tekućim gorivima. Udio korištenja nuklearnim gorivom, neznatno je porastao u tom razdoblju; u mnogim zemljama aktualna je rezerviranost prema nuklearnim energetskim rješenjima (politika i javnost) a s druge strane ne vidi se rješenje na dulji rok bez oslanjanja i na nuklearnu energiju (energetičari).

Konačno, uvećan je udio korištenja obnovljivim izvorima (ne toliko koliko – rekli bismo: nedovoljno realistično – priželjkuju *zeleni*): biomasom i otpadom, vodnim snagama, geotermalnom energijom, energijom vjetra i Sunčevom energijom; s 5 posto (1993)

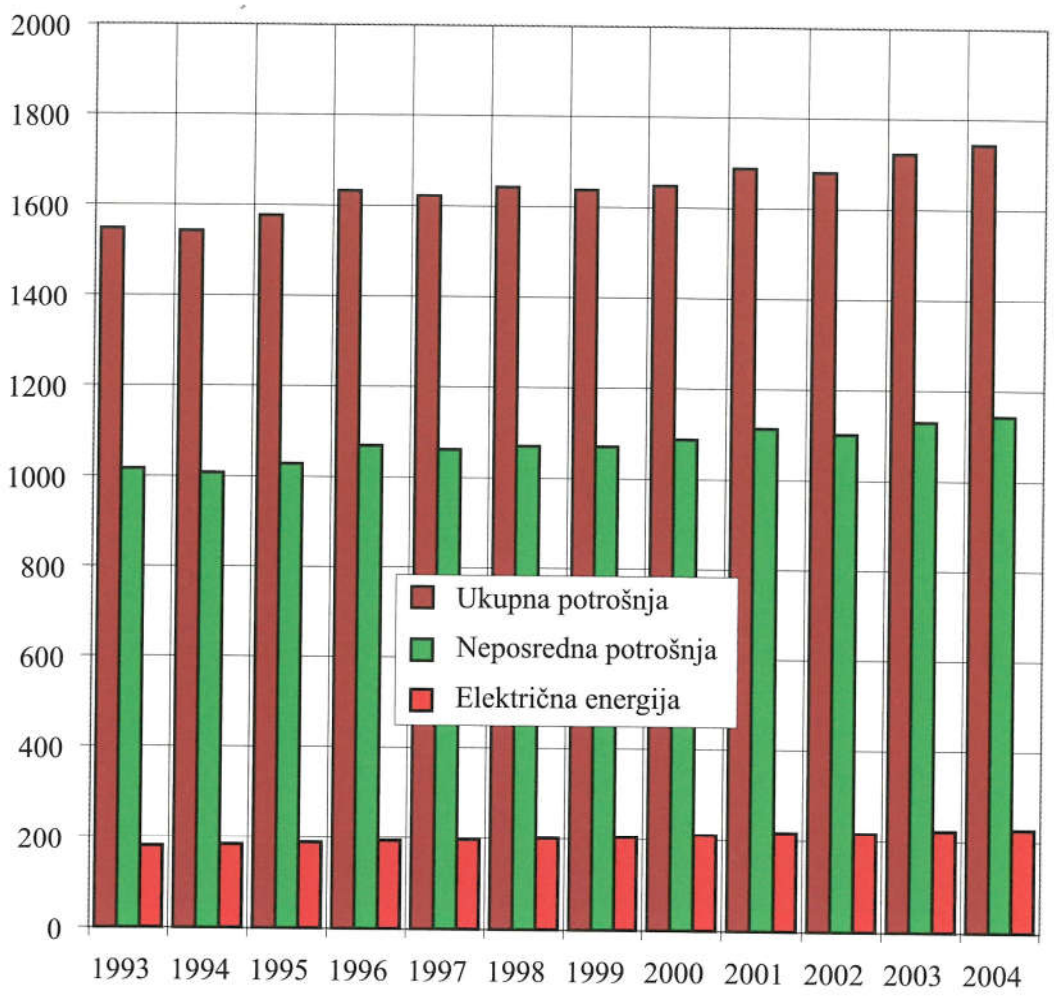



*Izvor: Eurostat*

*Slika 3.7. Obnovljivi izvori energije u prirodnim oblicima energije u EU-25* (Mtoe)

porastao je na 6,3 posto (2004). To je dvostruko manje od udjela obnovljivih izvora u svijetu, podsjećamo: u nerazvijenu svijetu je korištenje obnovljivim gorivima ujedno i jedino korištenje energijom! Na slici 3.7. prikazan je razvitak korištenja obnovljivim izvorima energije u EU-25, posljednjih desetak godina. Vidljiv je najveći udio biomase i otpada u prirodnim izvorima; 2004. godine imale su udio od gotovo 2/3 u svim obnovljivim izvorima u Europskoj Uniji. Istaknimo: tu je riječ o ukupnom korištenju tih izvora, ne o njihovu korištenju za pretvorbu u električnu energiju! Biomasa i otpad naglašeno se koriste za izravnu pretvorbu u toplinu. Sljedeći obnovljivi izvor su vodne snage (korištene u velikim i malim hidroelektranama) s udjelom od oko 1/4. Preostatak čine: geotermalna energija, vjetar, Sunčeva energija i ostali obnovljivi izvori; zajedno desetak posto.

Ukupna neposredna potrošnja energije u Europskoj Uniji povećana je s 1 016 Mtoe (1993) na 1 141 Mtoe (2004), povećanje neposredne potrošnje praktički prati povećanje potrošnje prirodnih oblika energije (slika 3.8). Nije došlo do pogoršanja totalnog stupnja djelovanja europskog energetskog sustava, on iznosi 66 posto. Dakle, u razvoju išlo se na što efikasnija energetska rješenja, koja nisu pogoršala totalni stupanj djelovanja. Udio se električne energije u neposrednoj potrošnji energije povećao sa 17,6 posto (1993) na 20 posto (2004). Dakle, svaka peta jedinica energije u neposredno iskorištenoj energiji Europske Unije u električnom je obliku (slika 3.4).



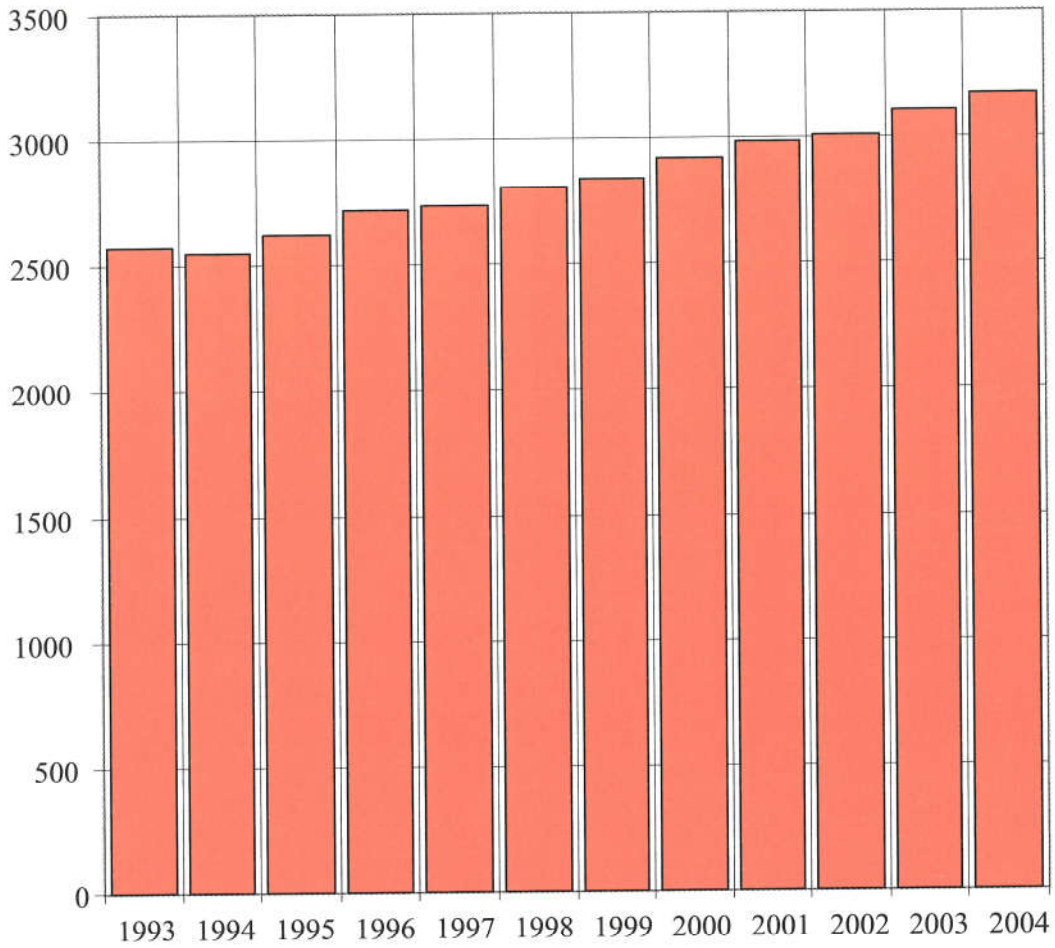

*Izvor: Eurostat*

*Slika 3.8. Ukupna potrošnja prirodnih oblika energije, neposredna potrošnja svih oblika energije i netopotrošnja električne energije u EU-25* (Mtoe)

Ostvarenja u proizvodnji električne energije su i ovdje (u Europskoj Uniji) najveća. Dok se korištenje svekolikom energijom i neposredno iskorištenom energijom povećalo za približno 12 posto, u istom razdoblju (1993–2004) povećanje proizvodnje električne energije ostvarilo se za 26 posto! Ukupna brutoproizvodnja električne energije u Europskoj Uniji je 3 168 teravatsati, što čini oko 20 posto svjetske proizvodnje (slika 3.9).

Dodajmo kako je ukupna europska proizvodnja električne energije 1950. godine sudjelovala s 25 posto u svjetskoj proizvodnji.

U Europskoj Uniji (EU-27) ukupna netopotrošnja električne energije bila je 2004. godine 2 650 teravatsati. Prosječna godišnja netopotrošnja električne energije po stanovniku je te godine bila 5 425 kWh, što je oko dva i pol puta više nego li prosječna potrošnja stanovnika svijeta. Gubici u europskim mrežama i vlastita potrošnja (uključivo energija za crpni rad CAHE) su 3 168 – 2 650 = 518 TWh, podjednaki netopotrošnji električne energije u Njemačkoj! Ili, postotno iskazano, gubici i vlastita potrošnja europskih elektrana i mreža čine 16,4 posto brutoproizvodnje.



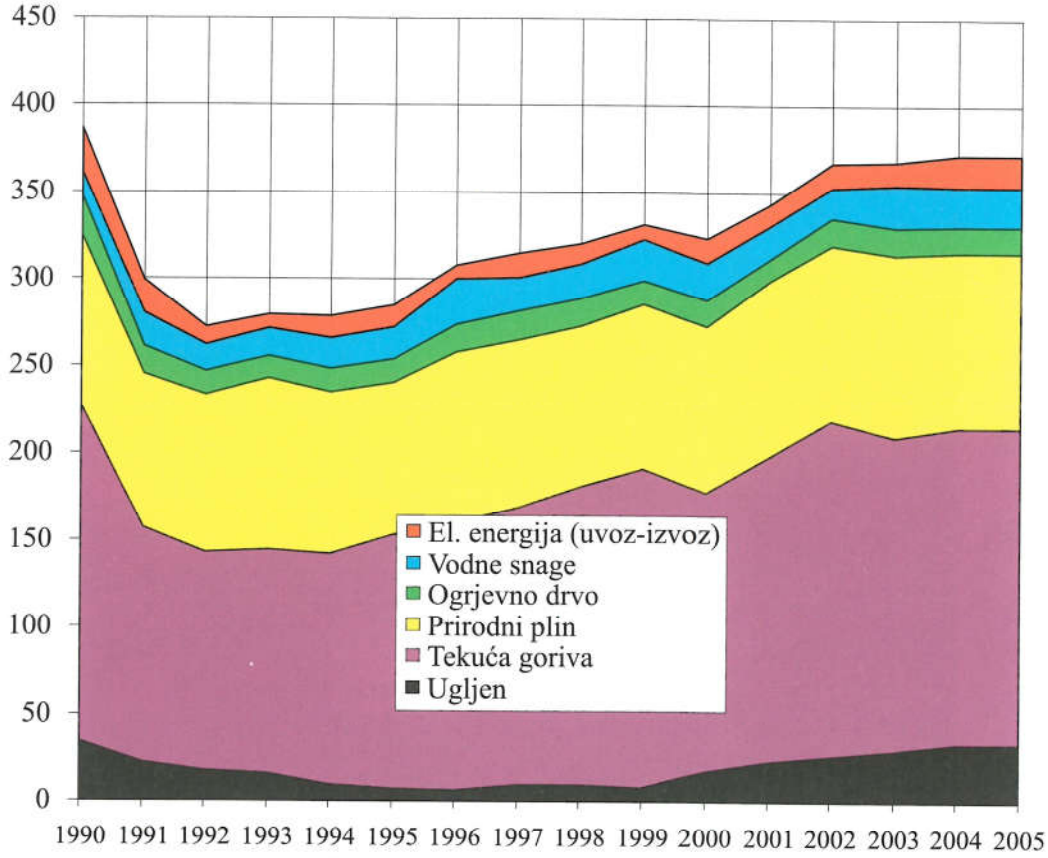

*Izvor: Eurostat*

*Slika 3.9. Brutoproizvodnja električne energije u EU-25* (TWh)

## Hrvatska i Europa

Najprije, brojem stanovnika od oko 4,44 milijuna (procjena za 2004. godinu) predstavljamo otprilike 0,7 promila svjetskog stanovništva. Prema ukupnoj potrošnji energije, 2003. godine koristimo se s 0,82 promila ukupne svjetske potrošnje, dakle trošimo otprilike samo 17 posto energije više po stanovniku nego li troši prosječni svjetski stanovnik. Istaknimo – to nije osobito, prosječni stanovnik Hrvatske samo malo je više potpomognut energijom od prosječnog stanovnika svijeta, u kojem živi barem dvije milijarde ljudi u doista skromnim civilizacijskim uvjetima.

No, mi ćemo se u nastavku osvrtati na prilike u Europskoj Uniji, jer su one za nas reprezentativnije od prilika u svijetu. U Hrvatskoj živi stanovnika kao otprilike 1 posto stanovništva Europske Unije (s 25 članica). Prema ukupnoj potrošnji energije, 2004. godine trošimo jednako kao 0,5 posto ukupne potrošnje Europske Unije, dakle trošimo polovinu energije po stanovniku od potrošnje prosječnog stanovnika Unije.




*Slika 3.10. Ukupna potrošnja svih oblika energije u Hrvatskoj* (PJ)

O detaljnijim energetskim pokazateljima za Hrvatsku raspolažemo uređenim podacima za razdoblje 1990–2005[20]. Ukupna potrošnja svih oblika energije smanjena je u promatranom 15-godišnjem razdoblju, nakon prve ratne godine, na najnižu razinu 1992. godine, da bi od tada (od 1992. godine) narasla na razinu 372 petadžula (PJ[21]) (2005), još uvijek nešto nižu od prijeratne (386 PJ, 1990)[22] (slika 3.10). Ratna razaranja, a potom posvemašnja i nekritična deindustrijalizacija, doveli su do toga da Hrvatska ni 15 godina nakon rata nije dostigla predratnu potrošnju ukupne energije! Trebat će nam za to otprilike 20 godina – toliko nas je unazadio rat i poratna zbivanja.

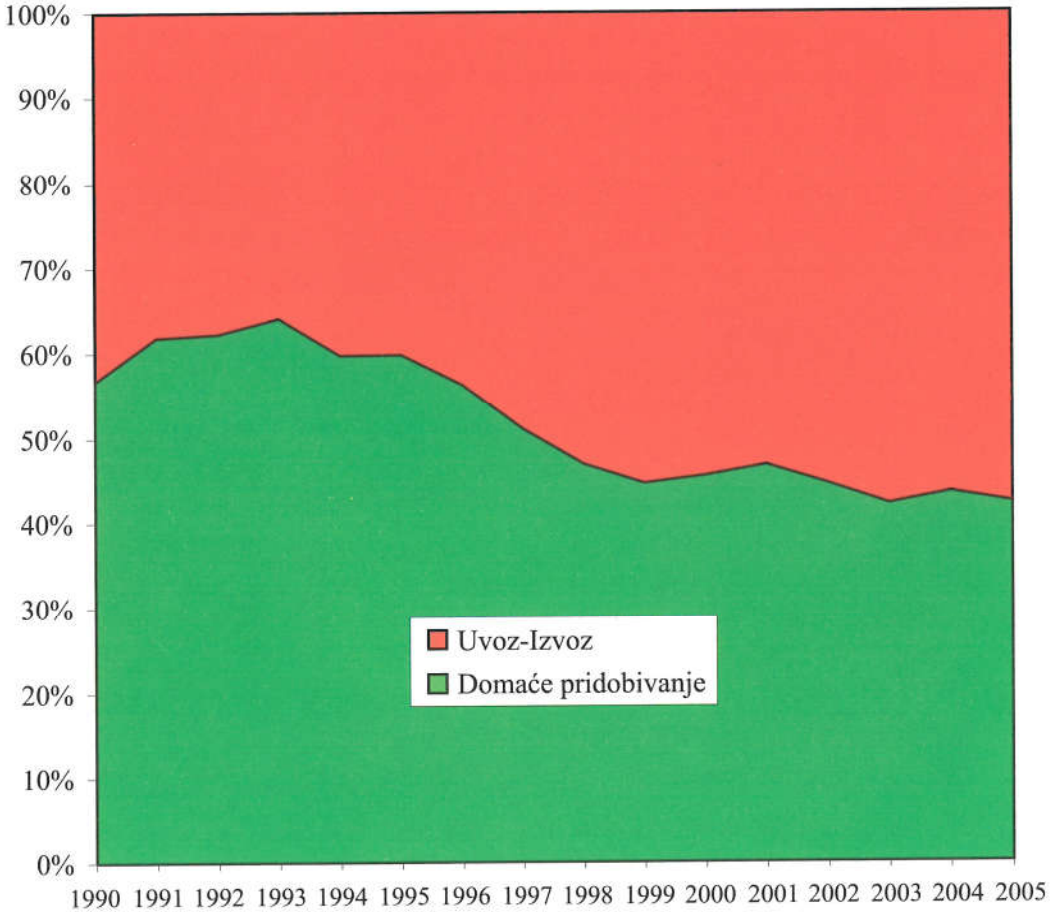
Domaće pridobivanje nafte smanjeno je u tom petnaestogodišnjem razdoblju na oko 40 posto (100% = pridobivanje u 1990.) a domaće pridobivanje prirodnog plina malo je poraslo, za 7,4 posto prema 1990. godini. Time je hrvatska vlastita opskrbljenost ukupne potrošnje energije snižena, odnosno: energetska *uvozna ovisnost* prešla je 50 posto; povećala se na 57,6 posto u 2005. godini, spram 43,3 posto u 1990. godini. Slika 3.11.

---

[20] Izvor podataka za Hrvatsku je *Energija u Hrvatskoj 2005.* Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva i Energetski insitut *Hrvoje Požar.*

[21] 1 petadžul (PJ) = $10^{15}$ džula (J); statistički podaci za Hrvatsku iskazuju se petadžulima, faktor konverzije petadžula u milijune tona ekvivalentne nafte je: 1 PJ = 0,02388 Mtoe, ili obrnuto: 1 Mtoe = 41,87 PJ

[22] Računato s faktorom konverzije proizvodnje električne energije hidroelektrana u prirodnu energiju vodnih snaga od 3,6 PJ/TWh – sukladno europskim/svjetskim statistikama; za razliku od citiranog izvora podataka, koji računa s faktorom ~10 PJ/TWh




*Izvor: Energetski institut Hrvoje Požar*

*Slika 3.11. Vlastita opskrbljenost Hrvatske u ukupnoj potrošnji svih oblika energije*

Uspoređujući naše prilike s prilikama u Europskoj Uniji, izlazi da je zbroj udjela ugljena i nafte u našoj potrošnji prirodnih oblika energije podjednak tom zbroju u Europskoj Uniji. Međutim, tamo se naglašenije koristi ugljen a kod nas neopravdano premalo. Dok je udio ugljena u potrošnji prirodnih oblika energije Europske Unije 2004. godine bio oko 18 posto u nas je te godine ostvareno samo 8 posto. To nije razumno; ugljen ima najveće rezerve od svih fosilnih goriva (trajale bi oko 175 godina uz sadašnju svjetsku godišnju potrošnju), rezerve ugljena *najpravednije* su raspodijeljene po globusu u odnosu na druga fosilna goriva (ima ga na svim kontinentima), cijena ugljena najstabilnija je među svim fosilnim gorivima, moguća je vrlo diversificirana opskrba, tako da uvoznik ne ovisi o *hiru* ili ucjenama dobavljača. Europa je tradicionalno okrenuta proizvodnji ugljena ali i međukontinentalnoj njegovoj dobavi – priključak Hrvatske na te tokove bio bi time olakšan. Plovni put Dunavom i jadranske luke omogućuju diversificiranu dobavu ugljena iz čitava svijeta...

Drugo a bitno, što je vidljivo iz usporedbe Hrvatske s Europskom Unijom, jest veći udio obnovljivih izvora u hrvatskoj bilanci prirodnih izvora energije. U Hrvatskoj se od obnovljivih izvora koriste danas praktički samo vodne snage i ogrjevno drvo. Međutim, njihov je udio 2004. godine u nas bio oko 10 posto (vodne snage 6,2 posto i ogrjevno drvo 4,0 posto), a u Europskoj Uniji u toj godini samo 6,3 posto. Ne brine nas kako to uzdići, nismo izgradili

novu hidroelektranu veće snage već gotovo 20 godina[23], a ogrjevnom drvetu iz godine u godinu pada korištenje[24]. Nedopustivo je u ruralnim područjima koristiti za grijanje uvozni prirodni plin, jer su ta područja tradicionalno okrenuta ogrjevnom drvetu i to bi samo trebalo uzdržati i dalje poticati – suvremenijom dobavom i suvremenijim korištenjem (primjerice briketiranje i uvođenje centralnog grijanja na loženje briketima).

Treće, ništa manje bitno: netouvoznik smo električne energije već godinama. Uvoz električne energije je na razini 3-5 posto u bilanci svih ulaznih oblika energije i takvo kretanje na dulji rok nije poželjno. Svaka europska država nastoji na svaki način proizvoditi sama taj najprivlačniji (i, dakako, najskuplji) oblik energije, bez obzira na to što ga najčešće mora proizvesti iz uvezenog prirodnog oblika energije. Ali to je poluproizvod, njegovu preradu učinit će *u svome dvorištu* i time ostvariti elektroenergetsku neovisnost i sama *pokupiti vrhnje*, ne prepuštajući ga drugome. Kada naši političari govore o povećanju energetske neovisnosti Hrvatske, to apsolutno nije realno – naša ovisnost o uvozu neizbježno će samo rasti u godinama što dolaze, jer ne raspolažemo dovoljnim rezervama fosilnih goriva (primjerice, ugljena uopće nemamo, a vlastito pridobivanje nafte i plina nedovoljno je za našu potražnju i godinama će stagnirati ili blago padati). Realno i nužno bilo bi težiti našoj *elektro*energetskoj neovisnosti, a tu ne činimo dovoljno. Na europskoj tržnici danas još ima električne energije ali njezina cijena uporno raste[25]. Kada dođe do njezine nestašice, a doći će jer se u Europi gradi premalo elektrana[26], cijena će znatno porasti i moći će je plaćati samo bogatiji od nas. Dakle, presudno bi bilo uspostaviti ritam gradnje novih elektrana kakav smo imali prije tridesetak godina: u prosjeku, svake druge godine puštana je jedna nova elektrana u Hrvatskoj u pogon (u razdoblju 1952.-1989. godine, tablica 22.1).

Neposredno korištenje energijom postiglo je prijeratnu razinu 2004. godine; pozitivno kretanje – raste nam totalni stupanj djelovanja energetike! Neposredna potrošnja bila je 2005. godine 263 PJ a 1990. godine ostvareno je 258 PJ (slika 3.12). Udio tekućih goriva u neposrednoj potrošnji je 46 posto, veći je od udjela u Europskoj Uniji – znak kako se neracionalno i rastrošno koristimo prijevoznim sredstvima.

---

[23] Posljednje izgrađene velike hidroelektrane, HE Dubrava (76 MW) i HE Đale (41 MW), puštene su u pogon 1989. godine.

[24] Udio ogrjevnog drveta od 5,9 posto (1990) u potrošnji prirodnih oblika energije, opao je na 4,0 posto (2005).

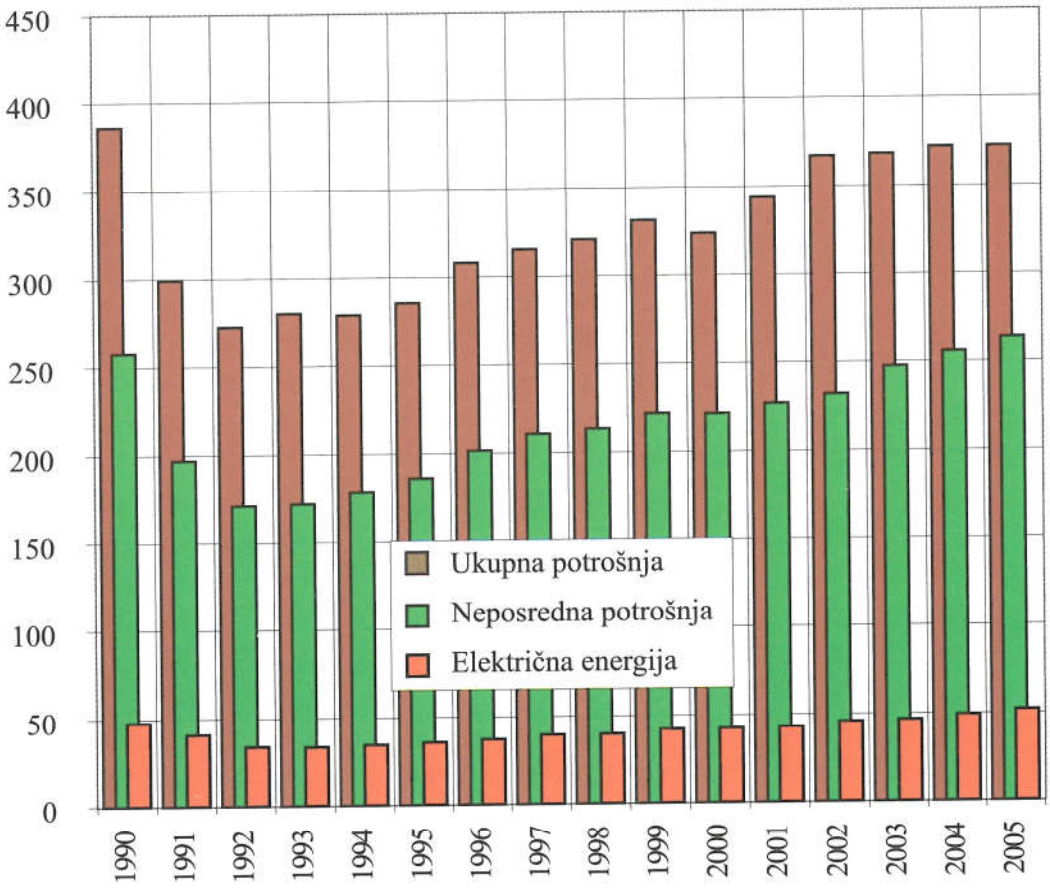
[25] Europska veletrgovačka cijena proizvodnje temeljne električne energije, na Europskoj energetskoj burzi u Leipzigu (EEX), uporno a značajno raste (eurocenta/kWh):

| Godina | 2003 | | | | 2004 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Kvartal | 1. | 2. | 3. | 4. | 1. | 2. | 3. | 4. |
| Cijena | 2,450 | 2,543 | 2,841 | 2,962 | 3,285 | 3,027 | 3,459 | 3,463 |
| Godina | 2005 | | | | 2006 | | | |
| Kvartal | 1. | 2. | 3. | 4. | 1. | 2. | 3. | 4. |
| Cijena | 3,348 | 3,646 | 4,785 | 4,511 | 5,253 | 5,820 | 5,348 | 5,318 |
| Godina | 2007 | | | | 2008 | | | |
| Kvartal | 1. | 2. | 3. | 4.* | 1.* | | | |
| Cijena | 5,155 | 4,391 | 4,964 | ~5,5 | ~5,5-6,5 | | | |

* Prema unaprijednim ugovorima

[26] Ilustrativan je primjer Austrije; dok je godinama, u razdoblju do 2000. godine bila uporni neto-izvoznik električne energije, od tada postaje neto-uvoznik. Izvozno-uvozni saldo *austrijske elektroprivrede* posljednjih godina (TWh):

| Opis | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Netoproizvodnja | 60,4 | 61,8 | 62,3 | 62,7 | 60,2 | 64,7 | 66,5 |
| Brutopotrošnja | 58,5 | 60,5 | 62,4 | 63,4 | 65,8 | 67,8 | 69,3 |
| Izvoz–uvoz | +1,9 | +1,3 | –0,1 | –0,7 | –5,6 | –3,1 | –2,8 |




*Izvor: Energetski institut Hrvoje Požar*

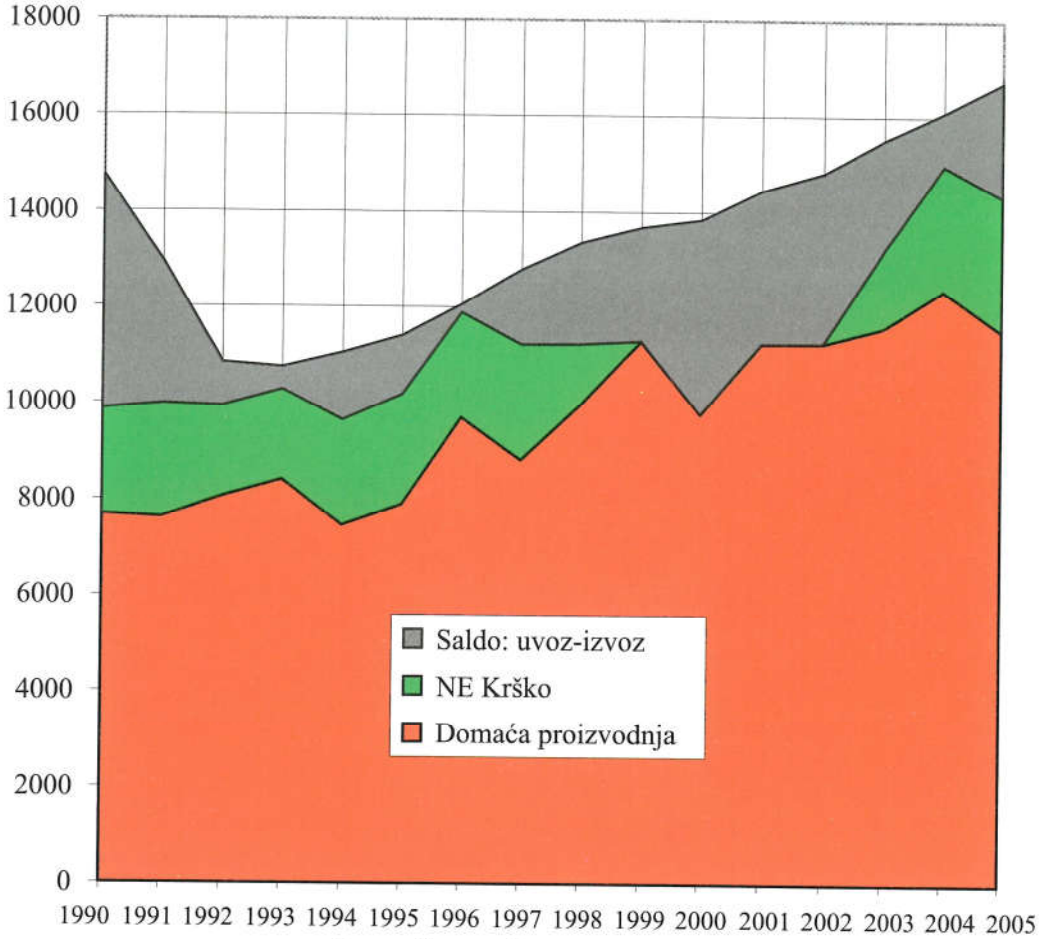
*Slika 3.12. Ukupna i neposredna potrošnja svih oblika energije i netopotrošnja električne energije u Hrvatskoj* (PJ)

Udio električne energije u neposrednoj potrošnji je oko 20 posto (2005), kao i u Europskoj Uniji (slika 3.4). Pitanje je da li je primjereno dostignutom našem ukupnom razvojnom stupnju toliko korištenje najplemenitijim energetskim oblikom, ili bi bilo primjereno manje. Svakako, bitni razlog takvom donekle prevelikom udjelu električne energije je njezina niska cijena, u odnosu na europske cijene. Koristimo se s oko 3 100 kWh električne energije po stanovniku (2004), dakle 57 posto potrošnje po stanovniku u Europskoj Uniji. Naš prosječni stanovnik praktički je polovično potpomognut električnom energijom spram prosječna stanovnika Unije.

Zanimljivo je zapaziti: u ratnim godinama je udio električne energije u neposrednoj potrošnji energije znatno porastao – posezalo se za električnom energijom kao univerzalnim nadomjeskom za druge oblike energije, za zagrijavanje, pripremu tople vode i kuhanje u skloništima i u stanovima. To je osobito bilo naglašeno 1991. godine.

Brutoproizvodnja električne energije na vlastitom državnom području bila je 12,5 TWh (2005) spram 7,7 TWh (1990), slika 3.13. Ukupna dobava električne energije na hrvatsko državno područje je brutoproizvodnja, uvećana za angažman NE Krško i uvozom električne energije (točnije: saldom uvoza i izvoza), te je iznosila 17,2 TWh (2005).

Nuklearna elektrana Krško je u 50-postotnom vlasništvu Hrvatske, no ipak u europskim elektroenergetskim bilancama njezina proizvodnja smatra se uvozom u Hrvatsku. Kao što




*Slika 3.13. Ukupna dobava električne energije u Hrvatskoj* (GWh)

je u energetskoj bilanci utrošak nuklearnog goriva iskazan sav u Sloveniji. NE Krško dopunjuje proizvodnju naših elektrana s oko 2-2,8 TWh godišnje. Ako to smatramo „našom" proizvodnjom, tada je naša ukupna proizvodnja porasla na 15,3 TWh u 2005. godini s oko 10 TWh u 1990. godini (dobava iz NE Krško u 2005. godini bila je 2,8 TWh).

Tada bi naš uvoz minus izvoz, dakle neto-uvoz, bio na razini 2–4 TWh godišnje; kretao bi se između 20 i 25 posto ukupne dobave električne energije, što nikako nije povoljno. Međutim, sukladno europskom gledanju i proizvodnju NE Krško treba uzimati kao uvoz. Tada je naša elektroenergetska uvozna ovisnost između 25 i 35 posto.

Uz netopotrošnju električne energije od 14,4 TWh u 2005. godini, izlazi da su gubici u mrežama te vlastita potrošnja u elektranama i mrežama iznosili 17,2 – 14,4 = 2,8 TWh ili 16,3 posto ukupne dobave električne energije (dakle brutoproizvodnje uvećane za saldo uvoza i izvoza). Premda se to, u prvi mah, čini povoljnim (jednako je toliko u EU-27; 16,4 posto), ipak nije tako. Velik je udio uvozne električne energije, pa za nju nije trebalo ulagati vlastitu potrošnju elektrana, i velik je udio hidroelektrana, čija je vlastita potrošnja razmjerno mala. Dakle gubici u hrvatskim mrežama, osobito distribucijskoj, nešto su veći no u europskim.

Na kraju, recimo to da je proizvodnja električne energije u Hrvatskoj 1950. godine bila 577 gigavatsati, a potrošnja 666 gigavatsati, dakle u pedeset godina korištenje se električnom energijom gotovo utridesetostručilo!

Konačno, po prosječnom stanovniku Hrvatske, iz sektora energetike emitira se oko 4,5 tone ugljikova dioksida (2003), što je nešto više od svjetskog prosjeka (4 tone, 2003), ali manje nego što je potrošnja ukupne energije po stanovniku Hrvatske veća od prosječne svjetske. Zahvaljujemo to – prije svega – visokom korištenju vodnim snagama (4,8 posto u potrošnji prirodnih oblika energije spram svjetskih 2,2 posto, 2003. godine).

# 4

# Povijesni put korištenja električnom energijom

## Doba do Voltina izuma

U antičko vrijeme uočene su električne pojave, trljanjem jantara[27]. (I danas možemo to uočiti trenjem češlja o kosu, oblačenjem ili svlačenjem odjeće iz sintetičkih materijala, hodanjem po sintetičkom sagu i u nekim sličnim prilikama.) U to vrijeme, uočen je i magnetizam željezne rudače, magnetita. Prvi poznati magnetski izum je kineski kompas iz 1124. godine.

U blizini Bagdada 1936. godine pronađena je struktura za koju se utvrdilo kako potječe iz 1. stoljeća prije nove ere, koja se sastojala iz željeznog štapa uronjena u bakreni cilindar. Ako se ta struktura ispuni grožđanim sokom, daje električni napon od 0,5 V. Smatra se da je služila galvanskom postupku pozlaćivanja. To bi bila prva poznata primjena električnog izuma iz staroga vijeka.

Prvi poznati električni izum iz novog doba je Franklinov gromobran iz 1752. godine, posljedica Franklinovih eksperimenata s atmosferskim električnim pražnjenjem.

Sve do kraja 18. stoljeća, električne su se spoznaje i prvi izumi morali oslanjati na elektricitet trenja i na Lajdenske boce (preteča kondenzatora) koje su se nabijale i tako predstavljale izvor električnog napona te praznile i tako predstavljale izvor slabašnih i kratkotrajnih električnih struja.

Evo kronologije nekih značajnijih događaja iz tog razdoblja.

– 585. Elektricitet trenja i magnetizam (Tales iz Mileta)
– 420. Prva predodžba atoma (Demokrit)
1124. Kompas u Kini, prvi poznati magnetski izum
1269. Rasprava o magnetima (P. Peregrinus)
1510. Vodno kolo (L. da Vinci)
1600. Zemljin magnetizam i elektricitet trenja; ime električnim pojavama (W. Gilbert)
1663. Elektrizacijski stroj (O. Guericke)
1672. Električna iskra nakon nabijanja vodljive kugle trljanjem (G. W. Leibnitz)
1690. Prvi parni stroj (D. Papin)
1729. Vodiči i nevodiči (S. Gray)
1733. Dvije vrste elektriciteta (C. F. C. du Fay)
1745. Lajdenska boca, prvi kondenzator (E. J. Kleist)
1747. Jednake količine negativnog i pozitivnog elektriciteta (Watson i B. Franklin)
1752. Gromobran, prvi korisni električni izum (B. Franklin)
1763. Predodžba polja (R. Bošković)
1765. Parni stroj (J. Watt)
1770. Djelovanje elektriciteta na žablje krakove (L. Galvani)
1773. Sila između dva naboja (H. Cavendish)
1785. Osnove elektro- i magneto-statike (C. -A. Coulomb)
1797. Pojam potencijala (G. Green, na radovima Poissona)

[27] Jantar, žuta, crvena ili smeđa smola prastarog crnogoričnog drveća. Jantar, na grčkom = elektron; odatle ime električnim pojavama.

## Doba do početka javne elektrifikacije svijeta

Pravi revolucionarni skok nastupio je 1799. godine Voltinim (slika 4.1) izumom električnog članka, baterije, u kojoj se kemijska energija pretvara u električnu. Od tada opažači i izumitelji raspolažu dugotrajnijim izvorom električne energije te može započeti plodonosni hod prema ključnim sagledavanjima električnih pojava i izumima. Koji su, nakon Voltina članka, prvih desetljeća 19. stoljeća, doista brojni i sve opsežniji.

*Slika 4.1. Alessandro Volta (1745–1827)*

S druge strane, izumi parnog stroja (Watt, 1765, slika 4.2), vodne turbine (Francis, 1849. i Pelton, 1884) te parne turbine (Laval, 1883), omogućuju proizvodnju rotacijske mehaničke snage, koju samo treba privesti generatoru i eto agregata za pretvorbu mehaničke u električnu energiju, koji je trajan praktički koliko je potrebno, odnosno sve dok je raspoloživ izvor vodene pare (za parni stroj ili parnu turbinu) ili vode (za vodnu turbinu).

*Slika 4.2. James Watt (1736-1819)*

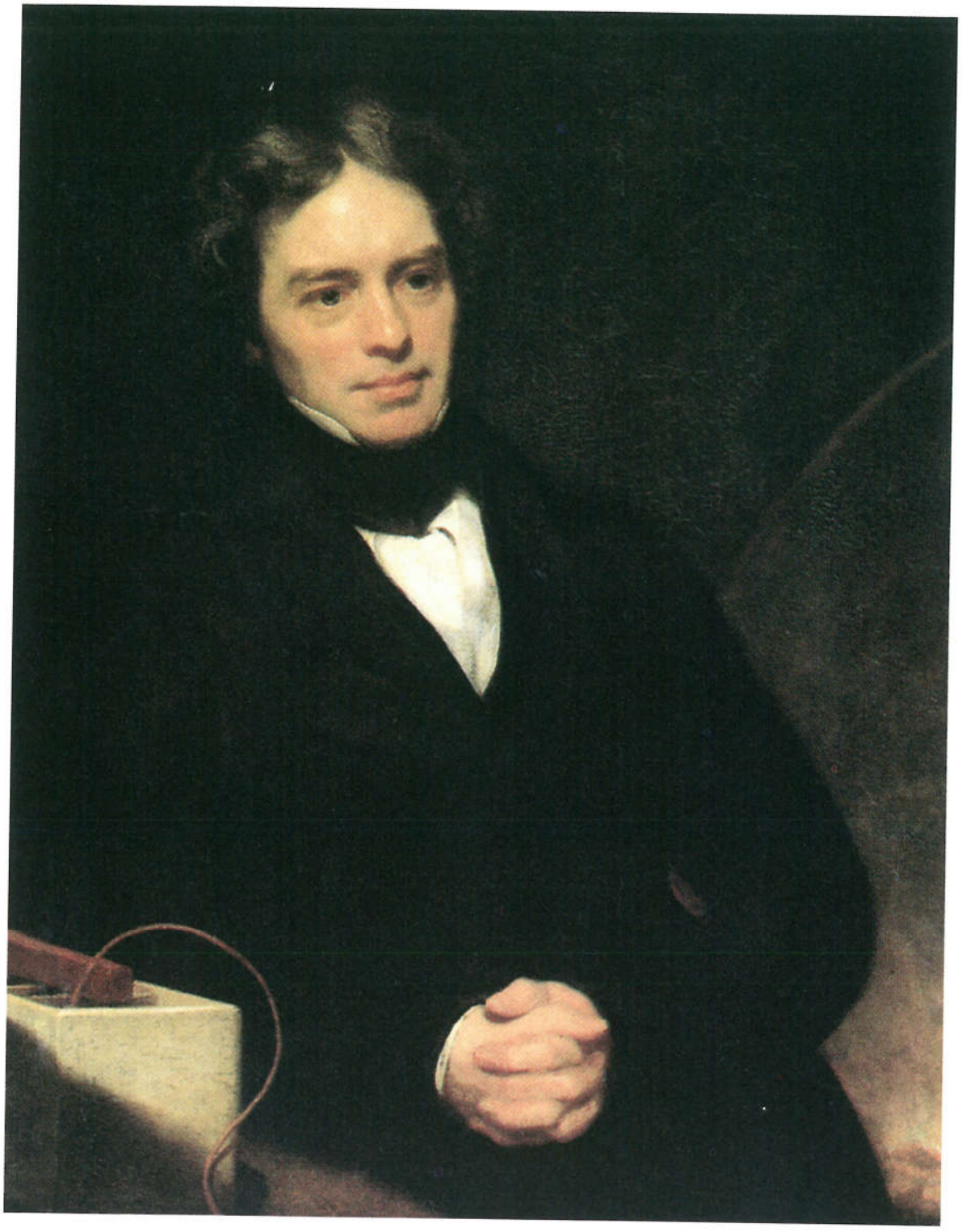
No bilo je potrebno – za ostvarenje generatora, koji će mehaničku energiju vrtnje pretvarati u električnu energiju – povezati električna i magnetska zbivanja. Uspio je to (1820) Oersted uočivši elektromagnetizam i Ampère (slika 4.3) koji uočava silu između vodiča sa strujama, te razliku električnih i magnetskih pojava, ali uz zajedničko ishodište – naboj u mirovanju ili gibanju. Ako je električni naboj u mirovanju, javljaju se električke manifestacije a ako je u gibanju – magnetske. Naboj u usmjerenom gibanju je električna struja. Tih godina ostvaruje se i elektromagnet. Dakle, stalna struja izaziva magnetsko polje u nutrini i okolini namota kojim teče. Godine 1826, Georg Simon Ohm (slika 4.4) formulira *Ohmov zakon*, najelementarniji zakon elektrotehnike.

Konačno, Faraday (slika 4.5) formulira 1831. godine zakon elektromagnetske indukcije, koji kaže da se u svitku, kojim je obuhvaćen vremenski promjenjiv magnetski tok, inducira napon, dakle određuje i kvantificira prožimanje električnih i magnetskih pojava. Bitna je vremenska promjena magnetskog toka obuhvaćena zavojem ili svitkom. Nakon nekoliko koraka drugih izumitelja oko konstrukcije generatora, Siemens (1866) tvori dinamostroj, iskoristivi generator istosmjerne struje, u kojem zaostali magnetizam statora inducira početni napon na rotorskom namotu koji se privodi na statorski namot, pojačavajući uzbudnu struju što pojačava inducirani napon na rotorskom namotu, sve do punog napona. (I danas se okretni uređaj za proizvodnju električnog napona vrtnjom kotača bicikla naziva *dinamo*.) Dvije godine ranije (1864) Maxwell (slika 4.6) genijalno formulira zaokruženu teoriju elektromagnetskog polja (*Maxwellove jednadžbe*), koja je temeljem i suvremenom poimanju i gledanju na električne i magnetske pojave (naboj u mirovanju uspostavlja osobito električno polje u svojoj okolini a naboj u gibanju uspostavlja osobito magnetsko polje u svojoj okolini...).

*Slika 4.3. André Marie Ampère (1775–1836)*

Javljaju se i prvi elektromotori, uređaji koji pretvaraju električnu energiju u mehaničku rotacijsku energiju. Tako je praktična spoznaja upotpunjena: mehanička vrtnja dade se generatorom pretvoriti u električnu energiju, a ova – opet – privedena elektromotoru omogućuje obrat: pretvorbu električne energije u mehaničku vrtnju.

*Slika 4.4. Georg Simon Ohm (1789–1854)*



*Slika 4.5. Michael Faraday (1791–1867)*

Galvanizacija, početak pretvorbe električne energije u kemijsku energiju, poznata je od 1840 (Jacobi). Toplinski efekt električne struje poznat je od 1841 (Joule, slika 4.7). Idemo prema pretvorbi električnog oblika energije u svjetlo. To uspijeva Davyu 1813. otkrivši električni luk, a Foucault tvori 1848. godine prvu uporabljivu elektrolučnu svjetiljku. Tako se ulična elektrolučna rasvjeta počinje primjenjivati u Parizu 1877. godine.

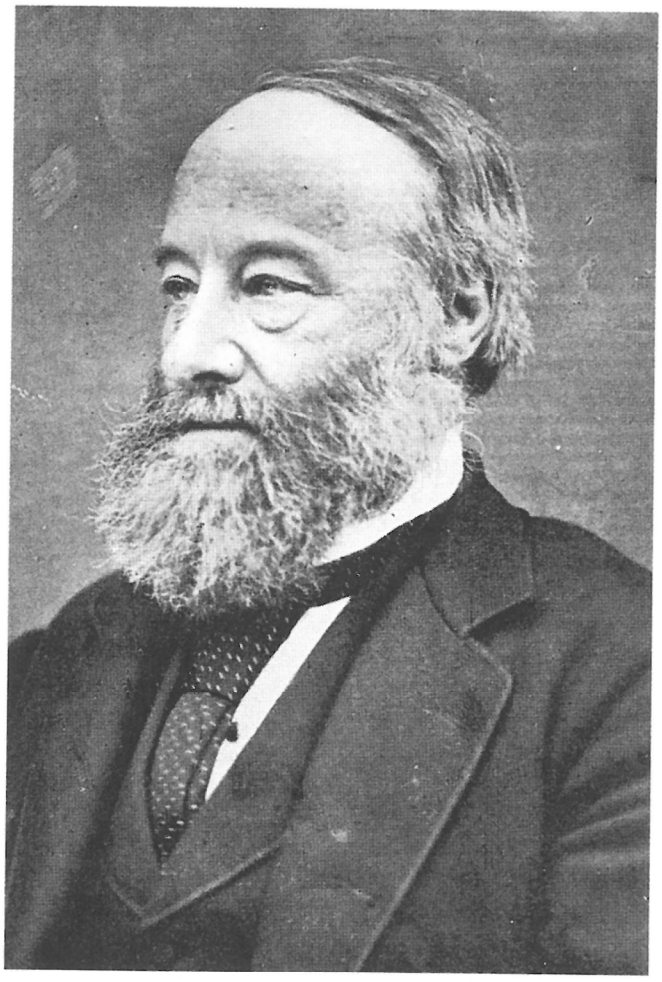
*Slika 4.6. James Clerk Maxwell (1831–1879)*

Morse (slika 4.9) je 1837. godine izumio telegraf, uređaj za prijenos pisanih poruka na daljinu električnim načinom, doduše kodiranih tzv. Morseovom abecedom. Ali to otvara jedno novo područje primjene električne energije: telekomunikacijsko. Što biva upotpunjeno 1876. godine uređajem za razmjenu govornih poruka na daljinu električnim putem, izumljen je telefon (Bell, slika 4.10). Telegraf i telefon koriste vodiče za prijenos električnih signala, a Hertz najavljuje mogućnost bežičnog prijenosa signala, eksperimentima s radiovalovima (1876) te otkrićem elektromagnetskih valova (1888).

Do početaka javne elektrifikacije u svijetu (1882), kada dolazi do radikalnog umnažanja korisnih električnih izuma, povijesni tijek zbivanja na električnoj pozornici te na srodnim poljima – bez kojih se ne bi mogla razvijati tim koracima niti primijenjena elektrotehnika, prikazuje se kronološkim redom u nastavku.

1799. Prvi galvanski element (A. Volta)
1813. Električni luk (H. Davy)
1820. Elektromagnetizam (H. Ch. Oersted)
Sila između vodiča sa strujama, razlikovanje električnih i magnetskih pojava uz zajedničko ishodište – naboj u mirovanju ili gibanju (M. -A. Ampère)
1821. Elektromagnet (Arago/Gay-Lussac)
Termoelektrični efekt (Seebeck)

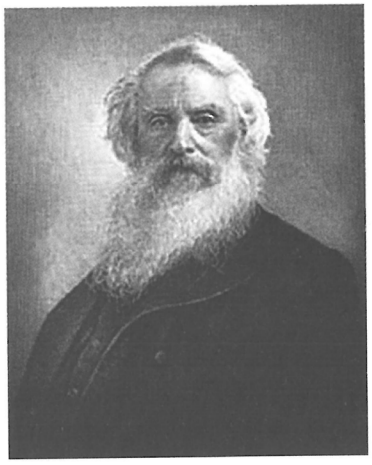
1826. Ohmov zakon (G. S. Ohm)
1829. Prva željeznica (R. Stephenson)
1831. Elektromagnetska indukcija, prožimanje električnih i magnetskih pojava (M. Faraday/J. Henry)
1832. Prvi rotirajući generator izmjenične struje na ručni pogon (H. Pixii)
Elektromagnetski igličasti telegraf (P. L. Schilling von Canstadt)
1833. Elektromagnetski igličasti telegraf (C. F. Gauss i W. Weber)
1834. Prvi elektromotor veće snage, napajan iz baterije (M. H. von Jacobi)
Elektroliza (M. Faraday)
1837. Galvanoplastika (M. H. von Jacobi)
Iskoristivi telegraf (S. F. B. Morse)
1840. Galvanizacija (M. H. Jacobi)
1841. Jouleov zakon toplinskog djelovanja električne struje (J. P. Joule)
1844. Osvjetljenje elektrolučnom svjetiljkom, Trg Concorde u Parizu (L. J. Deleuil)
1847. Kichhoffovi zakoni (R. Kichhoff)
1848. Prva iskoristiva elektrolučna svjetiljka (J. B. L. Foucault)
Počeci elektromedicine (G. B. A. Duchenne)



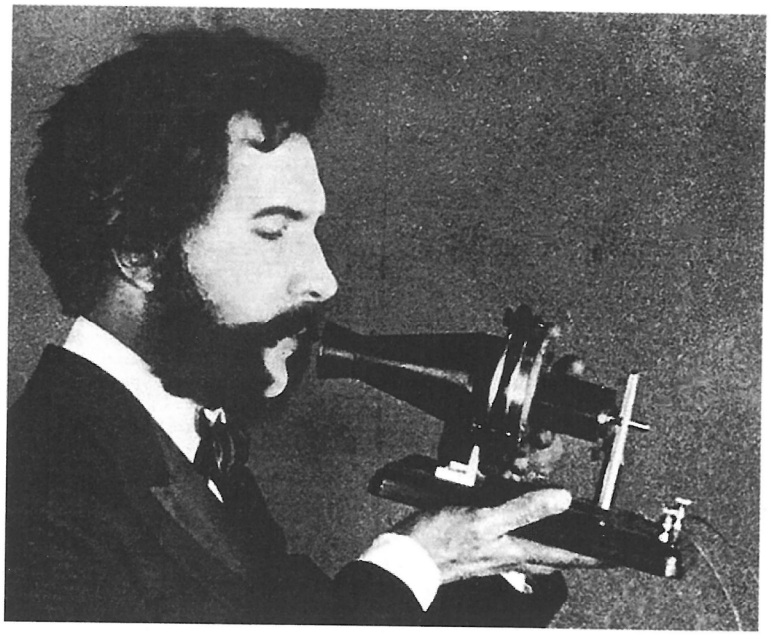
*Slika 4.7. James Prescot Joule (1818-1889)*

*Slika 4.8. Gustav Kirchhoff (1824-1887)*

1849. Vodna turbina (J. B. Francis)
1854. Tinjalica (H. Goebel)
1858. Katodne zrake – elektroni (J Plucker)
1859. Olovni akumulator (G. R. Plante)
1860. Električno paljenje u plinskom motoru (E. Lenoir)
1864. Teorija elektromagnetskog polja, temelj suvremenoj predodžbi (J. C. Maxwell)
1866. Dinamostroj (W. Siemens/Ch. Wheastone/C. F. Varley)
Prvi podmorski telegrafski kabel ispod Atlantika (C. W. Field)
1869. Periodni sustav elemenata (D. Mendeljejev)
Generator istosmjerne struje (Z. Gramme)
1876. Telefon (G. Bell/E. Gray)
Uspješni eksperimenti s radiovalovima (H. Hertz)
Četverotaktni motor (N. A. Otto)
1877. Ulična elektrolučna rasvjeta u Parizu
Mehanički fonograf (T. A. Edison)



*Slika 4.9. Samuel F. B. Morse (1791-1872)*



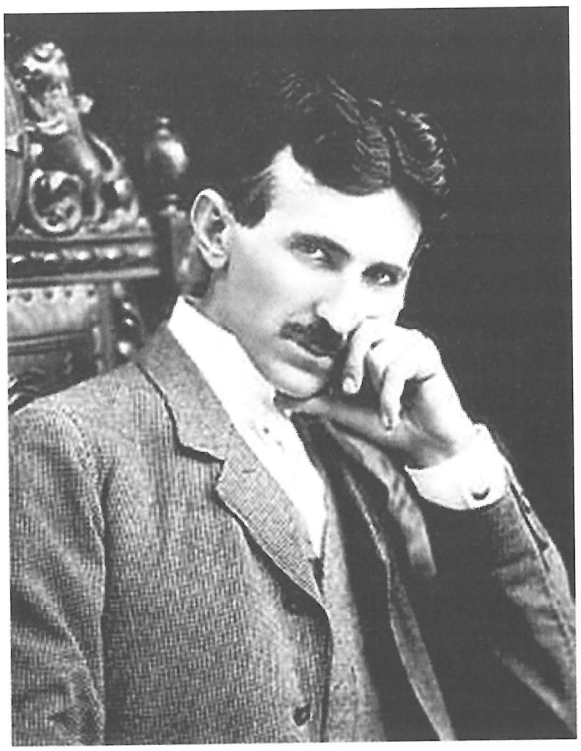
*Slika 4.10. Alexander Graham Bell (1847–1922)*

1878. Lučna peć (W. Siemens)
Ugljeni mikrofon (D. E. Hughes)
1879. Električna žarulja s ugljenom niti (Th. A. Edison)
Prvi generator izmjenične struje (E. Thomson)
Električna lokomotiva od 3 KS (W. Siemens)
Hallov efekt (E. H. Hall)
1880. Električno dizalo (W. Siemens)
1881. Izravni spoj parnog stoja i električnog generatora (W. Siemens)
Prvo izračunavanje elementarnoj naboja (H. Hellmoholz)
Prvi električni tramvaj, u Berlinu

## Doba nakon početaka javne elektrifikacije

Prve javne elektrane[28], dakle takva poduzeća kojima je jedina svrha neki drugi oblik energije pretvoriti u električni oblik i prodati tu električnu energiju potrošačima-kupcima, javljaju se tijekom 1882. godine u New Yorku i u Londonu. To su bile elektrane istosmjerne struje, iz kojih se električna energija distribuirala na neveliku okolnu udaljenost. Time je postavljen kamen temeljac na putu svjetske javne elektrifikacije. Eksplozija koja će uslijediti bila je neizbježna,

[28] Ovdje je primjenjena sintagma *javne elektrane*, a dalje će biti korištena i sintagma *javna elektroprivreda*. Dakako, danas je elektroprivreda *a priori* javna, pa je taj atribut suvišan. Međutim, povijesno gledajući, na početku bile su *privatne* elektrane (kazališta, bolnice, hoteli, toplice), *industrijske* elektrane (kod nas, primjerice: ona u Županji koja je opskrbljivala Tvornicu tanina i bačava, već od 1880. godine kada je dio naselja bio rasvjetljen iz dinamo-stroja, a na javnu električnu mrežu Županja priključuje se tek 1954!), *mješovite* elektrane (javno-industrijske) i – konačno – *javne* elektrane. Danas srećemo industrijske elektrane (i u nas), pa elektrane željeznica (npr. u Njemačkoj), a iz najnovijeg doba i IPP-elektrane (elektrane neovisnih proizvođača; engl. *IPP – independent power producer*) To su elektrane izgrađene i korištene neovisno o javnoj elektroprivredi. Prodaju svoju proizvedenu energiju na otvorenom tržištu električne energije.



*Slika 4.11. Nikola Tesla (1856–1943)*

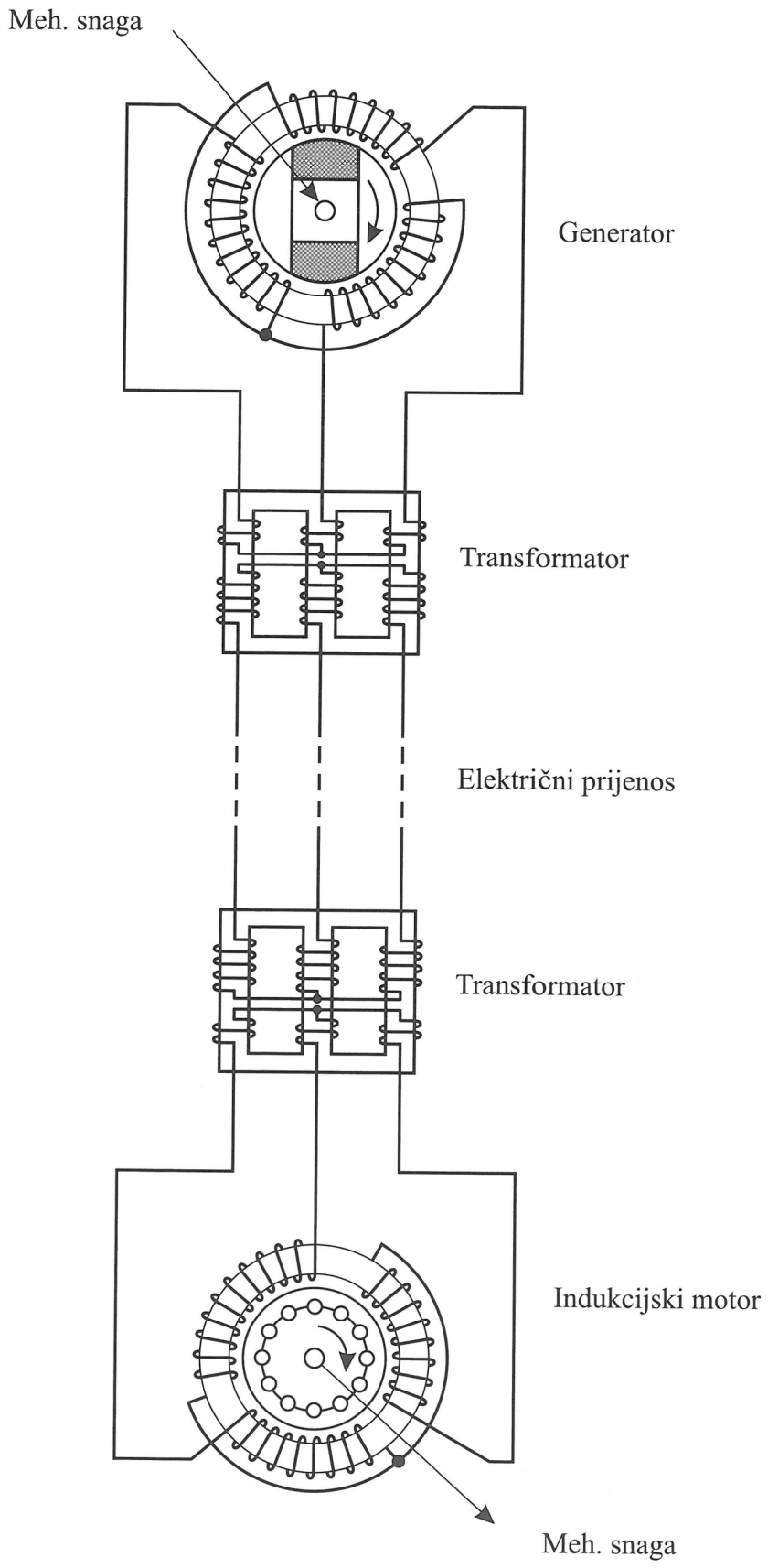
jedna su do tadašnja otkrića jedva dočekala masovniju primjenu, a druga su se jednostavno množila – kako na strani dobave električne energije, tako i na strani njezina korištenja. Iste godine (1882) izveden je i prvi svjetski prijenos istosmjernom strujom pri naponu 2 000 V, na udaljenost 57 kilometara (Miesbach–München), uz stupanj djelovanja od samo 22 posto.

U prvom desetljeću javne elektrifikacije svijeta, osamdesetih godina pretprošlog stoljeća, razvijaju se takve elektrane s pripadnom okolnom niskonaponskom mrežom istosmjerne struje u manjim mjestima i uz njihove rubove, odnosno u gradskim blokovima velikih svjetskih gradova (blokovske elektrane). Odgovarajuće nizak istosmjerni pogonski napon (nekoliko stotina volta), nije omogućavao prijenos većih snaga na veće udaljenosti.

## *Pobjeda* sustava izmjenične struje nad sustavom istosmjerne struje

Javlja se Teslin (slika 4.11) izum asinkronoga, indukcijskog, elektromotora[29] (1883) koji jednostavnošću rješenja i izvedbe nema do danas premca među svim motorima, izum transformatora (1884) i Teslina zamisao električnog prijenosa snage višefaznim sustavom (1888), što osigurava ključni događaj: *pobjedu* sustava izmjenične struje za proizvodnju, prijenos, distribuciju i masovno korištenje električnom energijom.

[29] Taj motor zapravo, po jednostavnosti i konstrukcijskoj *čistoći*, rekli bismo genijalnoj eleganciji svoga rješenja, prednjači među svim motorima uopće. Zamislimo ga: statorski paket limova s uloženim namotima i električnim priključnicama, rotorski paket limova s kratkospojenim električnim kavezom, osovina, dva ležaja i kućište – i *to-je-to*! Dakle, svega desetak relativno nepotrošivih komponenata; gdje je to prema motoru s unutrašnjim izgaranjem, koji ima barem stotinjak vrlo složenih i potrošljivijih dijelova!




*Slika 4.12. Skica trofaznog električnog prijenosa prema Teslinoj zamisli*

Iznimnog je značaja Teslina zamisao o električnom prijenosu snage na daljinu izmjeničnom strujom, patentirana 1888. godine[30]. Time je potpuno protegnuta jedna *crta*: od okretnog magnetskog polja, koje rotira u generatoru pogonjenog mehaničkim zakretnim momentom, do induciranja napona tim okretnim poljem u namotima generatora, preko prijenosa izmjeničnom trofaznom strujom na daljinu, do drugog kraja na kojem se čitava *priča* invertira (slika 4.12). Tamo trofazna struja u namotima indukcijskog motora stvara opet okretno magnetsko polje koje vrti rotor tog motora i predaje zakretni moment mehaničkom opterećenju na osovini. Ako se na početak i kraj tog prijenosa izmjeničnom strujom stave transformatori, koji osiguravaju da napon prijenosa ima povoljnu vrijednost, može se svladati poželjna udaljenost prijenosa uz ne prevelike gubitke. Sve je ostvareno elektromagnetskom pretvorbom: u generatoru, u transformatorima i u motoru – bez kolektora[31], koji bi posredovali u generatorskom i motorskom rješenju s istosmjernom strujom, a transformator u tom slučaju ne bi niti došao u obzir! K tome, usprkos vremenski pulsnoj snazi svake pojedine faze trofaznog sustava, rezultantni trofazni zbroj tih snaga vremenski je konstantan. Time je vremenski konstantna, kako predaja mehaničke snage motorom na kraju – tako i mehaničko opterećenje turbine na početku tog prijenosa.

Godine 1891. ostvaruje se prvi prijenos trofaznom izmjeničnom strujom, pri naponu 15 kV, na udaljenost 175 kilometara, od HE Lauffen na rijeci Neckar do Elektrotehničke izložbe u Frankfurtu[32]. U Hrvatskoj se ostvaruje se prvi prijenos izmjeničnom strujom između HE Krka i Šibenika 1895. godine. U Americi gradi se HE Niagara (1895) i njezin prijenos do Buffala (1896), da bi i u Europi i u Americi u prvim godinama prošlog stoljeća došlo do primjene 30 i 50 kilovoltnog napona za prva opsežnija udaljavanja mjesta na kojima se električna energija može prikladno proizvesti, u hidroelektranama i termoelektranama, i mjesta na kojima se postupno razvija potražnja električne energije; za rasvjetu i druge potrebe u kućanstvima, u industriji, te za promet. I uz napon 110 kV, koji se javlja 1911. godine, na zemljopisnim kontinentalnim prostranstvima to su i dalje međusobno nepovezani elektroenergetski *otoci*, u kojima sada već sinkrono radi više elektrana, koje kombiniranjem angažmana svojih raspoloživih mogućnosti opskrbljuju potrošače na zahvaćenom području.

Dvadesetih i tridesetih godina prošlog stoljeća, u Europi i u Americi razvijaju se već veliki elektroenergetski sustavi u kojima se naglašeno koriste elektroprijenosni vodovi visokog napona za jednu karakterističnu pogonsku i ekonomsku svrhu. Naime, da se sustav oblikuje tako da se do svakog snažnijeg čvorišta potražnje ostvari mogućnost dobave iz više od jednog pravca te da povezane elektrane mogu biti korištene u skladu sa svojom raspoloživošću i ekonomičnošću. Da se hidroelektrane koriste punom snagom kada ima dovoljno vode te da se razmjerno tome da smanji angažman ili čak obustave termoelektrane. I obrnuto. Također, kada je jedna elektrana neraspoloživa, da je omogućena opskrba iz drugih, ma koliko bile udaljene. Također još, kako bi se što više angažirale elektrane s jeftinijom proizvodnjom a što rjeđe elektrane sa skupljom proizvodnjom. Takav sustav nastaje primjerice u Njemačkoj, između sjevernih područja s termoelektranama i južnih područja pretežno s hidroelektrana-

[30] Teslin patent br.382.280 prihvaćen 1. svibnja 1888: *Electrical Transmission of Power.* Zamisao je genijalna, jer je do tada prijenos (mehaničke) snage bio ostvarivan osovinom i remenskim prijenosom remenicama, ne neveliku udaljenost, unutar jedne tvorničke hale. Drugačiji prijenos snage nije bio poznat! Pokušati se treba, u mislima, vratiti u predelektrično doba!

[31] Tumačenje uloge kolektora vidjeti na kraju poglavlja 2.

[32] Prema zamisli i pod vodstvom Oskara von Millera, Nijemca, koji je sudjelovao i pri realizaciji prvog svjetskog prijenosa istosmjernom strujom, devet godina ranije, a dat će pečat i pri osmišljavanju europskih elektroenergetskih sustava u početnim desetljećima dvadesetog stoljeća.

ma. Već 1922. godine u primjeni je prijenos pri naponu 220 kV, jer rastu snage i udaljenosti na koje treba takve velike snage prenositi. Godine 1926. ostvaruje se u Europi prekogranični prijenos električne energije, u paralelnom pogonu njemačke i švicarske mreže.

Odmah nakon Prvog svjetskog rata javlja se potreba za međunarodnim ujednačavanjem konstrukcijskih i pogonskih kriterija za opremu i objekte električnih mreža, pa se već 1921. godine osniva CIGRE[33], Međunarodno vijeće za velike elektroenergetske sustave, donedavna Međunarodna konferencija za velike električne mreže visokog napona, sa sjedištem u Parizu[34].

Godine 1925. osnovan je UNIPEDE[35], Međunarodna unija proizvođača i distributera električne energije.

U jednom trenutku razvoja, neposredno nakon Drugog svjetskog rata, dolazi i do oživljavanja primjene istosmjerne struje za prijenose s osobitim zahtjevima u pogledu veličine, udaljenosti i načina prijenosa, ali integriranih u osnovne elektroenergetske sustave izmjenične struje i uz proizvodnju i distribuciju pri izmjeničnom naponu. To komercijalno počinje 1954. godine na prijenosu švedsko kopno – otok Gotland, da bi danas bilo u upotrebi ukupno stotinjak takvih prijenosa u svijetu.

Ali, osnovna tehnologija javne elektroprivrede i dalje se rješava uz izmjenični napon i primjenjuje se sve viši napon za električni prijenos. Od godine 1952. u Švedskoj koristi se napon 380 kV. Za tu zemlju karakterističan je elementarni prijenos velikih proizvedenih količina električne energije u hidroelektranama na sjeveru do područja velike potražnje električne energije na jugu.

Primjenu sve višeg napona ponajprije uvjetuju sve veće jedinične snage agregata u elektranama, koji time postaju energetski i novčano povoljniji. Pedesetih godina prošlog stoljeća, najveća jedinična snaga turboagregata dosegla je 250 MVA, a početkom sedamdesetih 1 200 MVA, što vodi tada najvećoj naponskoj stepenici – reda 750 kV, da bi sredinom osamdesetih godina prošlog stoljeća u tadašnjem Sovjetskom Savezu otpočelo korištenje elektroprijenosnom linijom pod naponom 1 150 kV. Teško je reći kada i da li će uopće doći do daljnjeg povećanja izmjeničnog pogonskog napona.

Razvoj svekolikih primjena električne energije na stogodišnjem putu javne elektrifikacije može se samo skicirati i teško je moguće stupnjevanje po tome što je za čovječanstvo bilo važnije a bez čega bi se eventualno lakše moglo *proći* kroz dosadašnju povijest. Električna energija postupno je omogućavala život uz više svjetla i sjaja, uz manje muke, te lakše fizičko i duhovno svladavanje udaljenosti, a sve to javna elektroprivreda učinila je masovno dostupnim doslovno svakom građaninu civiliziranog svijeta.

---

[33] **C**onseil **I**nternational des **G**rands **R**éseaux **É**lectriques

[34] CIGRE ima doista zavidnu tradiciju, a danas ima nacionalne ogranke u 80 zemalja. Članice su elektroprivredna i proizvodna poduzeća, te znanstvene i izobrazne institucije iz sektora elektroenergetike. Stalno funkcionira 16 studijskih odbora CIGRE i brojne radne grupe tih odbora. Od osnutka, 1921. godine, svake druge godine održavaju se zasjedanja u Parizu, koja okupljaju delegate praktički iz čitava svijeta. Zaključci nisu pravno obvezujući, ali ih se svi sudionici nastoje pridržavati; CIGRE ima veliki međunarodni autoritet. Putem Hrvatskog ogranka CIGRE, Hrvatska je članica i uključena je u aktivnosti međunarodne CIGRE.

[35] UNIPEDE, International Union of Producers and Distributors of Electrical Energy. Paralelno s tom unijom, od kraja sedamdesetih godina prošlog stoljeća razvija se i EURELECTRIC, da bi se od kraja 1999. godine te dvije unije udružile u EURELECTRIC, Union of the Electricity Industry, Unija elektroprivrede, sa sjedištem u Briselu. Punopravne članice su elektroprivrede iz zemalja članica EU te iz zemalja kandidata za članstvo u EU (te je članica i Hrvatska elektroprivreda). Pridružene članice su iz preostalih europskih zemalja, uključujući Rusku federaciju, iz sjeveroafričkih zemalja, iz nekoliko saudijskih zemalja, iz Australije, Japana, Meksika i Koreje, te više velikih poslovnih sustava (poput ABB, AREVA, CESI, GE-Europe, KEMA, Siemens).

Svakako – u ljudskom civilizacijskom hodu, električno svjetlo značilo je bitnu prekretnicu: noć je pretvorilo u dan i omogućilo je praktički sve ljudske aktivnosti i izvan obdanice (slika 19.1). Električno svjetlo kao sjaj, izvor ugodnijeg i kulturnijeg života, elegancije, stila – skoro nadahnuća. Električno svjetlo bilo je najsnažniji početni poticaj javnoj elektroprivredi i nezaobilazno trajno njezino postignuće. Već 1849. primijenjena je u pariškoj operi elektrolučna rasvjeta, da bi praktički u svakom povijesnom primjeru početka elektrifikacije uvođenje električne rasvjete na javne prostore, u kućanstva i u industriju bilo obvezan početni korak. Razvoj je danas dopro do izvora svjetla s vrlo dugim vijekom trajanja i smanjenom potrošnjom ulazne električne energije po izlaznoj svjetlosnoj energiji, postupnim napuštanjem žarulja s užarenom niti. Već od početka tridesetih prošlog stoljeća primjenjuju se izvori svjetla sa svjetlećim izbijanjem u plinu, a od 1960. godine halogene žarulje.

Međutim, električni motor je uređaj koji je mnogostruko i – danas praktički nesagledivo, jer nam se i u mislima teško vratiti u *pred-elektromotorno* doba – olakšao rad i život čovjeka. Mehanički rad do tada je izvodio čovjek, snagom svojih mišića, potpomognut u ranije razvojno doba vodnim kolom i vjetrenjačom, a i snagom životinjskih mišića.

Početak javne elektrifikacije zatekao je tadašnju industrijsku proizvodnju s korištenjem ponajprije parnim strojem, ali i plinskim motorima, kao izvora pokretne snage u mnogim proizvodnim procesima. Stoljeće pare, zamijenit će nadolazak stoljeća električne energije[36], što se tiče pogonskih strojeva u proizvodnji. Teslin asinkroni motor izmjenične struje i danas ima najmasovniji udio u elektromotorima, ali sve složenije regulacijske zahtjeve rješavaju od njega kompleksniji elektromotori, s vremenom dopunjavani elektromehaničkim, poluvodičkim i mikroprocesorskim sklopovima. Milijarde elektromotora, vrte se *na svakom koraku* u današnjem svijetu...

Elektromotori, pored primjene u industriji i kućanstvima, osigurali su i pogonsko rješenje kopnenim prometnim sredstvima. Električni vlak i tramvaj u Berlinu, koriste se prije početka svjetske javne elektrifikacije. Londonska podzemna željeznica iz 1863. godine prešla je s parnog na električni pogon 1890. godine. Elektrificirana željeznica osobit je primjer kako se za kopneni transport može koristiti bilo koji prirodni oblik energije, jer se svaki prirodni oblik dade pretvoriti u električni oblik i tako univerzalno koristiti za pogon željeznice.

U industriji se električna energija, pored elektromotorne i rasvjetne primjene, koristi za elektrolučno i elektrootporno zavarivanje, za elektrolitičko izdvajanje metala iz rudače te elektrolitičko prečišćavanje metala i galvanizaciju. U proizvodnji čelika i drugih metala, najkvalitetnija taljenja ostvaruju se u indukcijskim pećima, od 1899. godine.

U kućanstvima je, osim za rasvjetu, električna energija najprije primjenjivana za kuhanje, glačanje i grijanje vode. Prva elektrificirana kuhinja demonstrirana je na Svjetskoj izložbi u Chicagu 1893. godine. Usisavač prašine je iz 1901. godine. Prvi električni hladnjak je iz 1910. godine. Stroj za pranje rublja dobiva 1920. godine elektromotor. Danas u razvijenim zemljama preko 90 posto kućanstava koristi električni hladnjak i stroj za pranje rublja.

---

[36] Korištenje parom u 18. stoljeću, najprije parnim strojevima a kasnije parnim turbinama, time i ugljena kao prirodnog izvora energije, te donekle i neposredno korištenje vodnih snaga za pogon, označilo je industrijsku revoluciju, prelazak čovječanstva na industrijski način proizvodnje materijalnih dobara. Druga industrijska revolucija nastupa krajem 19. stoljeća, upravo primjenom električne energije za pogon strojeva. Za nastavak, do današnjih dana, česta je podjela na još na dva doba: nuklearno doba (od početka korisne primjene nuklearne energije) i svemirsko doba (od prvih prodora čovjeka u svemir).

Prva telegrafska linija položena je 1844. godine između Washingtona i Baltimora, a 1866. uspostavljen je trajni telegrafski promet prvim transatlantskim kabelom. Bell je svoj telefon patentirao 1876. godine. To su počeci globalnih komunikacija, koje će se dolaskom javne elektrifikacije kao disperziranim izvorom pogonske energije proširiti na žična i bežična rješenja za prijenos poruka, govora, glazbe i slike. Prvi bežični signali preneseni su na prijelazu u 20. stoljeće, a prva javna radiostanica je iz 1920. godine. Javno emitiranje televizijskog programa traje od 1931. godine, a program u boji postoji od 1963. godine.

Prvo programibilno ali elektromehaničko računalo je načinio Zuse godine 1936., a 1946. načinjeno je prvo potpuno elektroničko računalo ENIAC[37]. Mikročip je *rođen* 1959. godine, kada je više tranzistora integrirano na jednoj pločici. Krajem 1986. ostvaren je čip od četiri megabita na pločici veličine 0,5 $cm^2$; omogućuje memoriranje sadržaja dvadesetak novinskih stranica. Prvo osobno računalo je Apple iz 1976. godine. Internet, globalno umrežavanje računala, ne bi se mogao ostvariti bez disperzirane opskrbe električnom energijom milijuna računala na svakom mjestu civilizirana čovjekova bivanja diljem svijeta.

Regulacija, automatizacija, mjerenje, upravljanje i daljinsko upravljanje, robotika, osvajanje svemira, svjetska računalna mreža ... brojnim elektrotehničkim primjenama, koje se umnožavaju danomice na svim točkama globusa, nema kraja!

Nuklearna energetika nastupa na svjetsku scenu opskrbe energijom u drugoj polovini prošlog stoljeća, isključivo zahvaljujući pretvorbi nuklearne energije, doduše posrednoj – iz unutarnje toplinske energije kojom se zagrijava rashladno sredstvo u reaktoru, u električnu energiju.

Spomenutim područjima korištenja dodajmo samo još primjenu elektrike u medicini, jer je od iznimnog značenja. Primjena fizikalne elektroterapije počinje početkom 19. stoljeća, rendgenski aparat je iz 1895., elektrokardiografski uređaj je iz 1903. a elektroencefalografski iz 1924. godine. Prvi elektronski mikroskop konstruiran je 1931., ultrazvučni dijagnostički aparat 1943., električni srčani stimulator je od 1958. godine, a od šezdesetih godina prošlog stoljeća primjenjuju se laserske zrake za operacijske zahvate. Posljednjih tridesetak godina koristi se u dijagnostici kompjuterska tomografija i magnetska rezonancija. Današnja liječnička ordinacija nezamisliva je bez elektrotehničkih pomagala!

Navedimo, opet kronološkim redom, najznačajnije događaje u svijetu koji su obilježili razvoj primjene električne energije od početaka svjetske javne elektrifikacije do danas.

1882. Prva javna elektrana 90 kW u New Yorku (Th. A. Edison)
Prvi prijenos električne energije istosmjernom strujom 2 000 V, Miesbach–München, 57 km (M. Deprez/O. von Miller)
1883. Okretno magnetsko polje (N. Tesla)
1883 Piezoelektricitet (P. Curie)
Parna turbina (C. de Laval)
Benzinski motor (G. Daimler/W. Maybach)
1884. Vodna turbina (L. Pelton)
Višestepena parna turbina (C. A. Parsons)
Transformator (Blathy/Deri/Zipernowsky)
1885. Automobil na tri kotača (K. F. Benz)
1885. Okretno magnetsko polje (G. Ferraris)

[37] **E**lectronic **N**umerical **I**ntegrator **a**nd **C**omputer

1886. Elektrolitička proizvodnja aluminija (P. L. T. Heroult)
Elektrootporno zavarivanje (E. Thomson)
Kanalne zrake – pozitivni ioni (E. Goldstein)
1887. Trofazni sustav s tri vodiča i višefazne struje (F. A. Haselwander/N. Tesla)
Gramofon s pločama (Berliner)
1888. Električni prijenos snage (N. Tesla)
Elektromagnetski valovi (H. Hertz)
Žarulja s ugljenom niti (Th. A. Edison)
1889. Uporabljivi asinkroni elektromotor (M. von Dolivo-Dobrowolsky)
Uporabljivi trofazni transformator (M. von Dolivo-Dobrowolsky)
Zvučnik (K. Frischen)
1890. Izolirane cijevi za električne vodiče (S. Bergmann)
Elektrolučno zavarivanje (N. S. Slawanoff)
Prva električna podzemna željeznica, u Londonu
1891. Prvi prijenos električne energije trofaznom izmjeničnom strujom 15 kV, Laufen–Frankfurt a. M., 175 km
(O. von Miller/Ch. Brown/M. von Dolivo-Dobrowolsky)
Teslin transformator 1 MV
1893. Fotoćelija (J. Elster/H. Geitel)
Automobil na električni pogon
1894. Kinematograf (A. i L. Lumière)
Rezonancija (O. J. Lodge)
1895. Antena (A. Popov/N. Tesla)
Radiotelegrafija (G. Marconi/N. Tesla)
1895. Uljni prekidač (S. Z. Ferranti)
Rentgenske zrake (W. C. Röntgen)
Elektronska teorija (H. A. Lorentz)
1897. Katodna cijev (F. Braun)
1896. Radioaktivno zračenje urana (M. Becquerel)
Dizelski motor (R. Diesel)
1897. Eksperimentalno otkriće elektrona (J. J. Thomson)
1898. Daljinsko upravljanje brodom (N. Tesla)
1899. Indukcijska peć (F. A. Kjellin)
Pupinovi svici kao pojačala (M. Pupin)
1900. Kvantna teorija (M. Planck)
Parna turbina u elektrani
1901. Električni usisavač prašine
1902. Električni pisaći stroj
1902. Žarulja s metalnom niti, osmijumska žarulja
Živin usmjerivač (P. Cooper-Hewit)
1903. Električna lokomotiva
Prvi let avionom (O. i W. Wright)
1904. Elektronska cijev: dioda (J. A. Fleming)
Žični prijenos slike, München–Nürnberg (A. Korn)

1906. Jednakost mase i energije (A. Einstein)
Plinska turbina (M. Holzwarth)
Trioda (L. de Forest)
Žarulja s volframovom niti (F. Hanamann)
Osnovana IEC[38]
1908. Radiotelegfafski promet preko Atlantika
1909. Umjetna smola, bakelit
1910. Neonska sijalica
Nadstrujni relej
1911. Struktura atomske jezgre (E. Ruthenford)
1912. Vodna turbina (V. Kaplan)
1913. Plinom punjena električna žarulja s volframovom niti (I. Langemuir)
Model atoma (N: Bohr)
Geotermalna elektrana
1915. Prvi cijevni odašiljač (A. Meissner)
1916. Kotao s izgaranjem ugljene prašine
1917. Kondenzatorski mikrofon
1920. Prva radiostanica, 1 kW, u Pitsburgu (F. Conrad)
1921. Osnovana CIGRE
1922. Tonkino (H. Vogt, J. Engl, J.Massolle)
1924. Elektrodinamski zvučnik
Elektroencefalograf
1925. Kvantna mehanika (Heisenberg/Borg/Vogt)
1926. Televizijski prijenos (J. L. Baird)
Osnovana UNIPEDE
1928. Geiger-Müllerov brojač
Teleprinter
1929. Kvarcna ura (W. A. Marrison)
Prva velika crpno-akumulacijska hidroelektrana
1930. Prvi bežični prijenos slike, preteča televizije
1932. Automobilski radioaparat
1931. Elektronski mikroskop (E. Ruska i drugi)
Prva teleprinterska mreža
Prve televizijske stanice u Berlinu i New Yorku
1935. Magnetofon (AEG)
1936. Programibilno računalo s relejima (K. Zuse)
1937. Generator hlađen vodikom
1939. Mlazni motor
Radar
1940. Toplinska crpka
1942. Prva nuklearna reakcija (E. Fermi)
1943. Ultrazvučni dijagnostički aparat
1946. Elektroničko računalo ENIAC, 18 000 elektronskih cijevi, brzina: 5000 zbrajanja u sekundi (J. W. Mauchly i J. P. Eckert)

[38] IEC = International Electrotechnical Committee, Međunarodni komitet za elektrotehničku normizaciju, osnovan u Londonu. Hrvatska je punopravna članica, putem Hrvatskog zavoda za norme.

1948. Tranzistor (J. Bardeen, W. Brattain, W. Shckley)
1949. Radioteleskop
1951. Osnovana UCPTE[39]
1952. Prvo programibilno elektroničko računalo s memorijom
1954. Prva nuklearna elektrana: Obninsk/tadašnji SSSR
Silicijska solarna ćelija
1955. Gorivna ćelija
1956. Tiristor
1957. Sputnjik, prvi Zemljin umjetni satelit (SSSR)
1958. Prvi industrijski robot
1959. Integrirani krug; mikročip
1960. Laser (T. H. Maimann)
1962. Telstar, omogućenje svjetske televizije
1963. Televizija u boji (W. Bruch)
Kasetofon
1964. Računalo IBM-360
1966. Elektrana na plimu i oseku
1967. Slojni, difuzni tranzistor (MOS-tranzistor)
Floppy-disk za računala
1969. Prvi ljudi na Mjesecu (N. Armstrong i E. Aldrin)
Tranzistor s efektom polja (FET-tranzistor)
Džepno računalo
1971. Asuanska brana, 2 100 MW
Osnovana CIRED[40]
1972. Mikroprocesor
1973. Svjetska energetska kriza
Osnovan CENELEC[41]
1975. Prvo kućno elektroničko računalo (Ed Roberts)
1976. Apple II, prvo masovno proizvedeno osobno računalo
Turbogenerator 1 600 MVA
1977. Transformator za ultravisoki napon
1979. Nezgoda u NE "Otok tri milje"
Prvi kompakt-disk (CD)
1980. Telefonski promet svjetlovodičem u Berlinu
Prijenos videoteksta
1981. Analogna mobitelna mreža, u Švedskoj i Norveškoj
1982. Najveća hidroelektrana na svijetu: Itaipu u Brazilu
Kućno računalo ZX Spectrum

---

[39] UCPTE, Union pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Electricité, Unija za koordinaciju proizvodnje i prijenosa električne energije, opširnije u poglavlju 8.

[40] CIRED, Congres International des Réseaux Electriques de Distribution, Međunarodna udruga za distribuciju električne energije. Ima neposredne članice (Austrija, Belgija, Danska, Finska, Francuska, Njemačka, Italija, Nizozemska, Norveška, Portugal, Španjolska, Švedska, Švicarska, Ujedinjeno Kraljevstvo, SAD) i u, sadašnje vrijeme, 22 pridružene članice, među kojima je i Hrvatska.

[41] CENELEC, European Committee for Electrotechnical Standardization, Europski komitet za elektrotehničku normizaciju; punopavne članice su zemlje Europske Unije, te Island, Norveška i Švicarska. Hrvatska je pridružena članica.

1983. Vjetrena elektrana reda 3 MW
1985. Električni prijenos pri naponu 1 150 kV (SSSR)
1986. Havarija NE Černobil
4-megabitni čip, 0,5 cm2
Operativni sustav Windows 1.0
1989. Organizacija Interneta (WorldWideWeb, www; 2007: 500 milijuna korisnika u svijetu)
1991. Digitalna mobitelna mreža, u Finskoj
1992. Direktna solarna elektrana 500 kW
1993. Otpočela proizvodnja početne etape najveće svjetske HE "Tri kanjona" u Kini
1995 64-megabitni procesor
DVD dospijeva na tržište
2000. Procesor Pentium 1 GHz
2007. Memorijski USB-štapić s 64 GB (gigabajta) memorije

## Sadašnje doba

U današnjem svijetu, trećina ukupno utrošenih prirodnih oblika energije koristi se za pretvorbu u električnu energiju da bi udio električnog oblika u neposredno iskorištenoj energiji (dakle od potrošača energije) bio više od 16 posto (2003). Karakteristična kretanja su prema diversifikaciji proizvodnje, ali uz što povoljniji stupanj djelovanja, ako je moguće uz istodobnu proizvodnju električne i toplinske energije (kogeneracija) te smanjenje svekolike emisije u okoliš. To se postiže skupocjenim postrojenjima za odsumporavanje i uklanjanje dušikovih oksida i smanjenjem udjela elektrana na fosilna goriva (ugljen, naftu i plin) ili povećanjem stupnja njihova djelovanja (poboljšavanjem načina izgaranja goriva i primjena kombi-elektrana), što vodi smanjenju emisije ugljikova dioksida, pri istoj proizvodnji električne energije.

Sadašnja (2003) godišnja prosječna neposredna potrošnja električne energije stanovnika svijeta je oko 2 200 kWh, uzmu li se u obzir svi stanovnici svijeta – i oni koji koriste električnu energiju i onih oko 1,6 milijarda koji je uopće ne koriste. Razvijene europske zemlje toliko su električne energije koristile polovinom šezdesetih godina prošlog stoljeća, danas ostvaruju dva do tri puta više. Tijekom čitava prošlog stoljeća ostvaren je u svijetu rast potrošnje svekolikih prirodnih oblika energije po prosječnoj stopi od oko tri posto godišnje. Korištenje električnom energijom raslo je značajno – dvostruko – brže, čak prosječno oko 6,4 posto godišnje (počevši promatranje od 1920. godine, jer za ranije razdoblje nema točnih podataka o svjetskoj proizvodnji električne energije). U krajnjoj liniji – uz mnogobrojne druge objektivne razloge tome – i činjenica da je elektroprivreda svuda bila otvorena i javna djelatnost, svakako je pridonijela takvom njezinom svjetskom razvoju. U civiliziranim zemljama, javna se dostupnost električne energije naprosto podrazumijeva.

Početkom milenija (2003), u svijetu proizvedeno je ukupno preko 16 600 teravatsati (točno 16 661 TWh) električne energije godišnje. U tome: 40,1 posto iz ugljena, 19,4 posto iz plina, 15,9 posto u hidroelektranama, 15,8 posto u nuklearnim elektranama, 6,9 posto iz nafte, te 1,9 posto iz elektrana na nekonvencionalne izvore (geotermalnih, sunčanih, vjetrenih, te elektrana na biomasu i otpad – poljoprivredni, komunalni i industrijski)[42].

[42] Key World Energy Statistics 2005, IEA

Elektroenergetski svjetski *giganti*, prema proizvodnji električne energije u 2003. godini, su: SAD (oko 4 000 TWh, gotovo četvrtina svjetske proizvodnje), zemlje Europske Unije (oko 3 000 TWh), Kina (oko 1 900 TWh) i Japan (oko 1 000 TWh). U nabrojanim zemljama proizvede se gotovo 60 posto svjetske proizvodnje električne energije. U njima živi nešto više od trećine svjetskog stanovništva (u SAD 291 milijun, u Europskoj Uniji 454 milijuna, u Kini 1 295 milijuna, te u Japanu 128 milijuna, ili ukupno 2 168 milijuna, prema 6 268 milijuna stanovnika svijeta u 2003. godini, prema podacima IEA).

*Tablica 4.1 Brutoproizvodnja električne energije u prvih deset zemalja u svijetu 2003. godine*

| Zemlja | Brutoproizvodnja (TWh) | Udio u svijetu (%) |
|---|---|---|
| Sjedinjene Američke Države | 4054 | 24,3 |
| Kina | 1907 | 11,4 |
| Japan | 1038 | 6,2 |
| Rusija | 914 | 5,5 |
| Indija | 633 | 3,8 |
| Njemačka | 594 | 3,6 |
| Kanada | 587 | 3,5 |
| Francuska | 562 | 3,4 |
| Ujedinjeno Kraljevstvo | 396 | 2,4 |
| Brazil | 365 | 2,2 |
| Ostale zemlje | 5611 | 33,7 |
| Svijet | 16661 | 100 |

*Izvor: Key World Energy Statistics 2005, IEA*

Poredamo li prvih deset pojedinačnih zemalja svijeta prema brutoproizvodnji električne energije u 2003. godini, tablica 4.1, opažamo da je u njima proizvedeno ukupno 2/3 svjetske proizvodnje!

Najveća hidroelektrana na svijetu je "Tri kanjona" na rijeci Jangce u Kini. Gradnja je počela 1993. godine, da bi elektrana otpočela proizvodnjom 2003. godine, u punom pogonu biti će 2009. godine – i imat će 26 hidroagregata ukupne snage 18 200 megavata! To je snaga četiri i pol puta veća od sadašnje snage svih hrvatskih elektrana (približno 4 000 MW). Prosječna godišnja proizvodnja HE "Tri kanjona" bit će 84 teravatsata. Od 1983. godine u pogonu je hidroelektrana Itaipu na rijeci Parana, duž paragvajsko-brazilske granice, sadašnje instalirane snage 14 000 megavata i prosječne godišnje proizvodnje oko 95 TWh. Najveća nuklearna elektrana na svijetu je Fukušima u Japanu, s deset reaktora na dvije lokacije – Daiichi i Daini, ukupne instalirane električne snage 9 096 megavata. Građena je postupno, između 1971. i 1987. godine, te sadrži – između ostalih agregata – i pet turboagregata od po 1 100 MW. Najveća nuklearna elektrana na jednoj lokaciji je japanska Kašivasaki-Kariva, ukupne instalirane električne snage 8 212 megavata. Najveća konvencionalna termoelektrana na svijetu je Kašima u Japanu, ukupne snage 4 400 megavata, u tome dvije jedinice od po 1 000 MW. Pogonsko gorivo je teško loživo ulje i sirova nafta.

# 5

# Električna energija

*Električna energija*[43] nezaobilazna je osnova materijalnih i društvenih djelatnosti te osobnog života današnjeg civiliziranog čovjeka.

Osobita svojstva električne energije pridonose tome da u energetskim gospodarstvima svijeta neprekidno raste udio električne energije u ukupno neposredno iskorištenoj energiji. Automatizacija, pa i robotizacija, kompjuterizacija, neslućeni razvoj telekomunikacija, a i neprestana čovjekova težnja za udobnijim življenjem i lakšim radom, određuju takav smjer kretanja i u predstojećoj budućnosti.

Nepoželjne osobine električne energije su ili nepremostive – moramo ih prihvatiti onakvima kakve jesu, ili se uspješno svladavaju posebnim mjerama, ali one znatno koštaju, te je električna energija skup proizvod!

Iskoristivu električnu energiju ne nalazimo u prirodi, atmosferska električna pražnjenja (munje) nisu iskoristive, u trenutku njihova nastanka preobražavaju se u drugi oblik energije (toplinu i zvuk).

Električna energija ne može se neposredno ni iskoristiti, osim u doista neznatnim količinama, u medicinskoj elektroterapiji. Ne koristi se izravno ni na koji drugi način, nego tek pretvorbom u koristan oblik (svjetlo, toplinu, mehanički rad i kemijski oblik).

Prekid opskrbe električnom energijom, ako je širih prostornih razmjera i dugotrajniji, izaziva značajnu degradaciju kvalitete života i posvemašnji zastoj u funkcioniranju današnjeg civiliziranog društva, osobito ako je riječ o visokourbaniziranim područjima (rasvjeta, javni promet, dizala, hlađenje, klimatizacija i zagrijavanje prostora, komunikacije, računala, brojni elektromotorni pogoni u – praktički – svakoj materijalnoj proizvodnji...).

Električna energija, dolazi na svjetsku energetsku pozornicu početkom osamdesetih godina pretprošlog stoljeća, kada se ostvaruju prve javne elektrane. Od tada teče razvoj javne elektroprivrede, koja je učinila – i čini neprekidno – to da se u civiliziranim društvima raspoloživost električne energije naprosto podrazumijeva, poput zraka i vode.

Ovaj uvod o električnoj energiji, moguće je pravo mjesto kako bismo još nešto istaknuli. To, da je u današnjem svijetu svaki treći džul prirodnih oblika energije pretvoren u električni oblik prije neposrednog korištenja, te da u neposrednom korištenju električna energija sudjeluje s oko 20 posto (u Europi i u nas), uvjetuje kod mnogih ljudi pomisao o električnoj energiji kao uopće jedinom obliku energije koji koristi čovjek. Te da drugi oblici uopće nisu energija; ta u svome nazivu ti drugi oblici niti ne sadrže riječ *energija*. Benzin ili dizelsko

[43] electrical energy, electricity (engl.; drugi naziv je bitno naglašeniji u primjeni), elektrische Energie, Strom (njem.; opet je drugi naziv uobičajeniji u primjeni). Ali: pogrešno je taj pojam (*električna energija*) nazivati *struja*, premda u svakodnevnom žargonu to neprekidno čujemo i čitamo. *Koliki je vaš mjesečni račun za struju?* – tako najčešće pitamo. No, i u drugih je govornika i pisaca tako, naglašeno primjerice kod Nijemaca (*Strom*). Amerikanci električnu energiju nazivaju *electric power*, najčešće skraćeno samo: *power*.
Inače, korijen takva nazivanja tog fenomena (*elektricitet*) je u grčkoj riječi *elektron* = jantar. U drugim jezicima je jednako, prilagođeno dakako tim jezicima. Elektricitet je: elektricity (engl.), Elektrizität (njem.), électricité (franc.), electricidad (španj.), elettricità (tal.), elektrika (sloven.), электричество (rus.)... Jedino je drugačiji korjen, od nama bližih naroda, u mađarskom jeziku: villamossag – tu je korjen *villam* = munja. Bogoslav Šulek, u svome *Hrvatsko-njemačko-talijanskom rječniku znanstvenog nazivlja* iz 1874. godine kaže za Electricität (njem.) = munjivo, munjina (hrv.). Taj se oblik riječi u nas zadržao djelomice sve do između dva svjetska rata u nazivu za *munjare*, elektrane.

gorivo kojima se često rastrošno koristimo u automobilima, topla voda ili grijanje kojima se koristimo u kućanstvima... Zaboravljamo da su i to energetski oblici, koji imaju svoje vrline, mane i cijenu.

Rado kritiziramo sve mane električne energije, osobito smo osjetljivi na njezinu cijenu, na utjecaje njezine dobave na okoliš, na smetanje naših posjeda električnim vodovima, na gubitke energije u mrežama – a oni su fizikalno uvjetovani, na prekid napajanja električnom energijom – ma koliko kratko trajao, ... (Čak, doduše ipak pojedinačno, dajemo i posve neutemeljene savjete elektroprivredi kako bismo je mi uredili.) Ostaje, ipak, 2/3 prirodnih izvora energije u neelektričnim oblicima i 80 posto neposredno iskorištene energije u tim oblicima, te bi bilo razumno posvetiti barem toliku kritičku pažnju, ako ne i veću, i spram tih drugih oblika energije.

Pomislimo samo kolika je dostupnost tim drugim energetskim oblicima (prošlo je radno vrijeme benzinske crpke ili nema crpke na sljedećih 50 kilometara, nedjelja pa ne možemo kupiti bocu tekućeg naftnog plina ili ogrjev ili ...)[44] i usporedimo je s dostupnošću električne energije – u svakoj utičnici, na svakom mjestu gdje živimo i radimo, svakog trenutka..., praktički bez ograničenja, a svakako bez ikakve najave bilo kome[45].

## Poželjna svojstva električne energije

Osobita svojstva električne energije čine je primamljivim, odnosno – u nekim slučajevima – čak neophodnim oblikom energije prije korištenja.

Pojedini se konvencionalni prirodni oblici energije ne mogu masovno ni koristiti bez prethodne pretvorbe u električnu energiju. Niskokalorični ugljen ne bi bio, zbog ekonomskih i energetskih razloga, uopće masovnije iskorištavan, jer bi za njegovu dopremu na mjesta korištenja trebalo uložiti više energije nego što je on sadrži. Ovako, na mjestu njegova pridobivanja, pretvori se u električni oblik i u tom obliku prenosi na potrebnu udaljenost, gdje se u tom obliku predaje na korištenje. Jednako je tako i s vodnim snagama: nezamislivo je njihovo korištenje dovođenjem do svakog trošila; pretvorbom u električni oblik to se ostvaruje jednostavno. Nuklearno gorivo, zamislivo bi bilo koristiti u toplanama ali potrebna je relativno blizu koncentrirana toplinska potražnja većeg opsega, jer se toplina ne može prenositi na iole veću udaljenost, preveliki bi bili gubici prijenosa.

---

[44] Potražimo primjere koji to – možda – opovrgavaju. Vrlo visoki prioritet, među svim uslugama koje organizira suvremeno civilizirano društvo, svakako ima pružanje hitne medicinske pomoći. Neki od nas doživjeli su, a svatko je kadar zamisliti, situaciju da se nakon pozivanja broja „94“ dobio odgovor kako su tog trenutka sve raspoložive ekipe i vozila na terenu te da se moramo strpjeti – ma koliko naš slučaj bio urgentan. Ako nismo u mogućnosti riješiti prijevoz vlastitom organizacijom, objektivno ograničenje kapaciteta hitne medicinske pomoći u ekstremnom će slučaju dovesti do fatalnog ishoda. Jednaka objektivno uvjetovana situacija zamisliva je i nakon pozivanja telefonskih brojeva „92“ ili „93“ (policija, vatrogasci).

[45] Doduše, jednako je tako slobodno posezanje za radio- ili TV-programom, no mjesečna pretplata za taj program posve je neovisna o tome koliko smo ga vremena koristili – slušali-ne slušali, gledali-ne gledali, svidjelo nam se-nesvidjelo, jednako se plaća. Emisijske stanice emitiraju jednakom snagom, ma koliko je tog časa slušatelja-gledatelja. Posezanje za telefonom već nije posve jednako kao posezanje za korištenjem električne energije: ako je pozvana strana zauzeta ili nedostupna, ako je telefonska mreža zagušena, naše pozivanje neće biti uspješno. Čin pozivanja je svojevrsna najava koja će se ostvariti, ako su ispunjeni uvjeti. Iskustvo je svakoga da ti uvjeti nisu uvijek ispunjeni. Uključivanje u promet na cesti također nije apsolutno slobodno, ovisi o trenutnim prometnim okolnostima i obavit će se s manjim, većim ili – ponekad – vrlo velikim odlaganjem. Čak na cestama za čije se korištenje plaća naknada, nije posve sigurno da neće nastupiti usporenje ili zastoj u prometu (primjerice zbog radova na cesti ili zagušenja na prilaznim rampama).

*Slika 5.1. Električna žarulja s užarenom niti*

Dio nekonvencionalnih oblika energije mora se koristiti u svom prirodnom dotoku (vjetar, Sunčevo zračenje, mali vodotoci). Prethodnom pretvorbom u električni oblik i plasmanom u elektroenergetski sustav – u kombinaciji s regulabilnom proizvodnjom konvencionalnih elektrana – omogućuje se stalno preuzimanje te energije. Inače, tko bi pristao da se koristi energijom samo kada ima vjetra ili osunčanosti ili kada mali vodotok nije presušio!

Jednostavan je prijenos velikih količina električne energije na vrlo velike udaljenosti uz ne pretjerane gubitke pri tome (nekoliko postotaka) i zapravo podnošljiv utjecaj na okoliš. Električna prijenosna mreža tvori transportni put za prijenos energije unutarkontinentalnih razmjera; univerzalno zamjenjuje ili rasterećuje ceste, željezničke pruge i cjevovode.

Vrlo su jednostavne i razmjerno jeftine instalacije za razvod električne energije do svakog trošila. Usporedimo to s prijevozom krutih ili tekućih goriva do svakog kućanstva, te potrebe njihova uskladištavanja uz mjesto korištenja, ili s instalacijama za distribuciju i kućni razvod plina. Rukovanje električnim uređajima-trošilima je jednostavno kao i njihovo održavanje.

Također, vrlo su jednostavni, u pravilu masovno proizvedeni i time jeftini, uređaji za pretvorbu električne u korisni oblik energije, trošila. Žarulja s užarenom niti (slika 5.1) ima okvirno pet komponenata od kojih je načinjena, otporna električna peć – u osnovi isto toliko (ako je bez regulacije), asinkroni elektromotor (slika 5.2) ima desetak komponenata, među kojima su potrošivi samo ležajevi – usporedimo njegovu jednostavnost sa složenošću npr. automobilskog motora, koji ima barem stotinu komponenata, među kojima znatan broj potrošivih. Ili, elektrolitska kada za galvanizaciju – zamisao još jednostavnija od žarulje: anoda i katoda, uronjene u posudu s elektrolitom.

*Slika 5.2. Elektromotori*

Vijek trajanja pojedinih električnih trošila također je vrlo velik. Obična žarulja s užarenom niti traje u prosjeku barem tisuću sati korištenja, štedna sijalica od osam do deset tisuća sati, suvremena fluorescentna cijev 12 tisuća sati, grijalica približno 15 godina, asinkroni elektromotor 25-35 godina (uz, dakako, potrebnu zamjenu ležajeva u tom razdoblju)...

Pojedino električno trošilo stavlja se u pogon bez ikakvih priprema ili najava bilo kome – trenutno, kada nam *padne na pamet*, na bilo kojem mjestu gdje dopire električna mreža, a to je svako mjesto normalnog čovjekova boravka, barem u civiliziranom svijetu. Možemo se u to uvijek uvjeriti, uključivši ili isključivši rasvjetu u blizini mjesta dok čitamo ovu knjigu!

*Slika 5.3. Mobilni telefon – trošilo električne energije*

To i čine milijuni potrošača-kupaca električne energije, u svakom novom trenutku. *Pri tome valja znati da je nakon uključenja/isključenja tih žarulja, neka regulacijska elektrana morala povećati/smanjiti svoju proizvodnju* za vrijednost snage tih žarulja uvećanu/sniženu za neizbježne gubitke u prijenosnoj i distribucijskoj mreži, što ih je izazvalo povećanje struje mrežom zbog uključenja naših žarulja ili smanjenje struje mrežom zbog njihova isključenja. Dakako, vrijedi tako u slučaju da je zbroj snaga novouključenih žarulja različit od zbroja snaga tog časa isključenih žarulja, što je vrlo vjerojatno.

Neka, a osobito najsuvremenija korištenja energijom (telekomunikacije, računala, vođenje procesa, automatizacija i robotizacija, medicinska pomagala, slike 5.3 i 5.4) – razvoj kojih je danas u snažnom zamahu, ne bi uopće bilo prihvatljivo ostvariti bez primjene električnog oblika energije. Ta područja ne bi se razvila do današnjeg stupnja ili se uopće ne bi ni *otvorila.* Telekomunikacije bi ostale na kurirskom prijenosu poruka, računala bi bila mehanička, daljinsko nadziranje i vođenje procesa je nezamislivo bez primjene električnih signala pri tome, liječnici bi se služili stetoskopom – a s kojom se ukupnom aparaturom danas služe i sva je utaknuta u bezbrojne umnažajuće utičnice... U uredima, službenici bi pisali

*Slika 5.4. Prijenosno računalo – trošilo električne energije*

na mehaničkom pisaćem stroju, vozila bi funkcionirala samo na pogon motora koji ne traže primjenu elektrike. Uopće nije moguće zamišljati kojim bi se smjerom razvijala rasvjeta; baklje, svijeće, fenjeri, petrolejke ili...

U pravilu, ostvaruje se vrlo visok stupanj djelovanja pri pretvorbi električne energije u koristan oblik. Primjerice, tramvaj je ekonomičniji u gradskom prijevozu od autobusa, pođe li se pri usporedbi jednog i drugog prijevoznog sredstva od prirodnih izvora energije. Usprkos brojnim pretvorbama koje mora proći prirodni oblik energije kako bi se pretvorio u električni oblik, pri konačnom korištenju, učinkoviti električni motori u tramvaju *pobjeđuju* dizelske motore u autobusu. Korištenje električnom energijom za zagrijavanje vode u dobro izoliranom električnom bojleru također ima vrlo visok stupanj djelovanja. Tu ipak treba reći da bi *pobjednik* bio prirodni plin iskorišten za zagrijavanje vode u bojleru, jer on dolazi do svakog trošila praktički u prirodnom svome obliku, uz eventualno potrebnu prethodnu degazolinažu.

Ekološki je električna energija vrlo povoljna i zato privlačna: čini neznatno ili praktički nikakvo zagađenje okoliša na mjestu pretvorbe električne energije u korisni oblik energije (svjetlo, mehanički rad, toplina, elektrolitički učinak).

Oko četvrtina ukupne neposredno iskorištene energije svijeta utroši se u prometu. Primjena električne energije za željezničku vuču omogućuje korištenje svim prirodnim oblicima energije za taj promet, elektrificirana željeznica (slika 5.5) troši onakvu mješavinu proizvodnje električne energije kakva se inače koristi u elektroenergetskom sustavu na koji je priključena. Dakle, moguće da uopće ne koristi naftne derivate, jer u tome sustavu nema elektrane ložene naftnim derivatima, a ako nije elektrificirana, trošila bi – na današnjem stupnju svog razvoja – isključivo naftne derivate u dizelskim motorima svojih lokomotiva. Korištenje električnom energijom neprestanim priključkom na električnu mrežu neizvedivo je za cestovna vozila a za brodove naprosto nije moguće. (Ovdje treba razlikovati elektromobil, automobil na električni pogon koji se razvija prvenstveno iz ekoloških razloga, i koristi akumulatore za svoj pogon, od zamišljanja cestovnog vozila koje bi se izravno koristilo električnom energijom iz električne mreže.)

*Slika 5.5. Elektrificirana željeznica*

Konačno, elektroprivreda je u civiliziranom svijetu ustrojena kao javna djelatnost, države osiguravaju uvjete za kvalitetnu, sigurnu i ekonomičnu opskrbu električnom energijom. I u najmodernijem tržišnom poimanju elektroprivrede – opet su države te koje bdiju nad sigurnošću fizičke opskrbe električnom energijom, te su spremne intervenirati ako bi ta sigurnost bila ugrožena. Na tržištu se slobodno određuje dio cijene električne energije, uz zajamčenu kvalitetu električne energije i nedvojbenu sigurnost opskrbe.

## Ograničavajuća svojstva

Električna energija ima, dakako, i nepoželjna (ali neizbježna) svojstva, koja djeluju ipak donekle ograničavajuće na korištenje njome.

Električna energija je prijelazni oblik energije pa ju je nemoguće uskladištiti u električnom obliku[46]. Time su potrebni znatno veći proizvodni, prijenosni i distribucijski kapaciteti od prosječno potrebnih, koji bi bili dovoljni da je električnu energiju moguće uskladištiti i onda – sukladno potražnji – *zahvaćati* iz tekuće proizvodnje i iz skladišta. I puniti skladišta kada je potražnja mala, a veća proizvodnja moguća[47]. Stoga sve jedinice elektroenergetskog sustava moraju biti dimenzionirane za kratkotrajna vršna opterećenja, koja godišnje traju desetak sati, a izvan tog vremena su manje ili više podopterećene. Zamislivo je, ali to je najčešće neprihvatljiva mjera za potrošače-kupce koji bi njome bili pogođeni, uvođenje redukcija potrošnje u kritičnom razdoblju elektroenergetskog sustava.

Fizikalno je apsolutno neizbježno: vrlo su veliki gubici pri pretvorbi mnogih prirodnih oblika energije u električni oblik. Primjerice, u starijoj termoelektrani samo se nešto više od jedne trećine uložene energije preobrazi u električnu energiju, a dvije trećine uložene energije preobrazi se u gubitke pretvorbe oblika energije i – što je dopunski nepoželjno – u konačnici nepotrebno zagrijava okoliš elektrane. U tom pogledu, najbolje stoje hidroelektrane (stupanj djelovanja veći od 90 posto), a još nešto lošije od konvencionalnih termoelektrana stoje nuklearne elektrane. Elektrane na nekonvencionalne izvore imaju niži stupanj djelovanja od konvencionalne termoelektrane – među njima najlošije stoje fotonaponske sunčane elektrane kojih je stupanj djelovanja nešto niži ili samo nešto viši od desetak posto! Elektrane na biomasu i otpad imaju opet niži stupanj djelovanja od konvencionalnih termoelektrana, jer je u pravilu riječ o jedinicama manjih ili srednjih snaga, s jednostavnijom i jeftinijom pripremom goriva i nižim parametrima vodene pare koja se u njima primjenjuje.

U pravilu je veliko opterećenje okoliša na mjestima proizvodnje električne energije, emisijom štetnih tvari i otpadne topline. Složene su i skupe mjere sniženja tog opterećenja na prihvatljivu razinu, značajno poskupljuju proizvodnju električne energije, no danas su ekološki neizbježne. Neizbježni rezultat izgaranja u konvencionalnim termoelektranama je ugljikov dioksid, koji se još ne dade izdvojiti iz dimnih plinova te se ispušta u okoliš, sudjelujući u stakleničkom efektu. Sumporove i dušikove okside moguće je izdvojiti posebno pridodanim ali skupocjenim postrojenjima za tu svrhu. Nuklearne elektrane, izuzme li se nuklearni akcident s katastrofalnim posljedicama, ne emitiraju štetne tvari pri normalnom korištenju, jedino preostaje otpadna toplina koja je nešto veća nego kod konvencionalnih termoelektrana. Elektrane na obnovljive izvore energije, ako su ložene kakvim nekonvencionalnim gori-

---

[46] Iskustvo s drugim robama nije takvo – uobičajeno se daju uskladištiti. Tekuća i plinovita goriva u rezervoarima, kruta goriva i sve druge materijalne tvari u odgovarajućim skladištima. Ako određene robe uzmanjka u skladištu, dobavit će se, a potražnja će se strpjeti (uz manje ili veće nezadovoljstvo zainteresiranih) ili se uopće neće ostvariti. U automobilu imamo rezervoar s četrdesetak litara goriva, benzinska crpka ima rezervoar od najmanje desetak tisuća litara – ako se poklopi da sadržaj jednog i drugog padne na nulu, ostat ćemo stajati i čekati rješenje ili uznastojati oko kakve improvizacije. Ni u kakvoj izravnoj vezi nije trenutna proizvodnja goriva u rafineriji s našom trenutnom vožnjom ili stajanjem našeg automobila. Ili trenutno pečenje kruha u pekari s uzimanjem kriški pri objedu za stolom. Ili tiskanje Krležina *Banketa u Blitvi* s danas zadanom lektirom kakvu učeniku. Ili šivanje toplije odjeće u tvornici konfekcije s jutrošnjim naglim zahlađenjem.

[47] Tvornica cipela ne mora nužno imati veći godišnji kapacitet nego što je godišnja potražnja cipela na njezinu tržištu. Propusnost nekog tunela smije biti manja od propusnosti prilazne ceste, prometovanje tunelom nešto će biti sporije no drugdje, ali će se odvijati. Škole ne trebaju nužno imati dežurstvo u doba kad nema nastave.

vom, praktički emitiraju nešto više štetnih tvari nego konvencionalne termoelektrane. Male hidroelektrane nemaju osobito velik utjecaj na okoliš, dok velike hidroelektrane mogu imati znatan utjecaj, širokim područjem vodozahvata u kojem se mijenja prirodni režim nadzemnih i podzemnih voda, utječe na mikroklimu, utječe na zatečen biljni i životinjski svijet. Sunčane elektrane, ako su izvedene fotonaponskim ćelijama, imaju velik utjecaj na okoliš, zauzimanjem velikih površina i – time – onemogućavanjem kakvog drugog korištenja tim prostorom, a vjetroelektrane opterećuju bliži okoliš neprestanom bukom.

Elektroenergetski sustavi, danas povezani na kontinentalnim prostranstvima, predstavljaju skupocjene materijalne strukture ogromnih dimenzija (primjerice hidroelektrane sa svojim vodozahvatima od više desetaka kilometara) i prostornog protezanja (primjerice dalekovodi, od više stotina kilometara), složene konstrukcije, proizvodnje opreme, izgradnje, djelovanja na okoliš, funkcioniranja i održavanja. U najmanju ruku, vrlo elementarno i očevidno, riječ je o zauzimanju prostora i onemogućavanju kakva drugog njegova korištenja. Elektroenergetski sustav danas se smatra jednim od najsloženijih sustava ili čak najsloženijim sustavom u suvremenom svijetu.

Na mnogim lokacijama prihvatljivim za izgradnju termoelektrana (zbog blizine nalazišta prirodnih oblika energije ili zbog raspoloživosti rashladne vode) nije moguća kogeneracija, istodobna isporuka topline uz električnu energiju, jer nema potrošača topline u razumno dohvatnoj blizini, pa se otpadna toplina objektivno ne može iskoristiti.

Električna mreža mora doprijeti gotovo do svakog mjesta civiliziranog čovjekova života, proizvodnje i svakog drugog djelovanja – što ponekad svakako nije ekonomično. Za čitav niz sela i zaselaka, pojedinačnih poljoprivrednih dobara i svakovrsnih drugih diversificiranih korisnika električnom energijom, može se dogoditi da plaćaju za električnu energiju manje nego li što se potroši za očitavanje brojila i naplatu te energije.

Trajna je potreba revitalizacije svih jedinica ili zamjene dotrajalih komponenata jedinica koje čine elektroenergetski sustav – i time, naravno, potreba ulaganja velikih novčanih sredstava – jer je vijek trajanja tih jedinica objektivno ograničen a postoji potreba za njihovim funkcioniranjem bez prestanka. Dopunski, postoje opravdana očekivanja javnosti za uvođenjem takvih rješenja koja povećavaju stupanj djelovanja i smanjuju opterećenje okoliša, što opet povećava potrebu novčanih ulaganja za željene modernizacije.

Zbog trajno prisutnog rasta potražnje električne energije (naprosto neizbježnog rasta), elektroenergetski sustav neprekidno se mora dograđivati. To može donositi najmanje dvije bitne neočekivanosti: nužnost posezanja i za neekonomičnijim rješenjima (jer su ekonomičnija već iskorištena) i naglašena mogućnost da svi objekti u sustavu ne budu u svim razdobljima svog pogona potpuno iskorišteni (jer novi objekti znaju imati sve veće pojedinačne snage, a potrebe ipak rastu postupno).

Zbog svega toga – objektivno je vrlo visoka cijena električne energije u odnosu na cijenu ostalih oblika energije (osobito onih koji se i u prirodnom obliku mogu koristiti neposredno: prirodni plin, ogrjevno drvo ili rovni ugljen).

Neracionalna je pretvorba električne energije u toplinu (osim iznimno), a toplinske potrebe čovječanstva su preko 50 posto neposredno iskorištene energije. Električnu energiju apsolutno ne treba koristiti za zagrijavanje, kuhanje i pripremu tople vode, ukoliko je raspoloživ kakav drugi oblik energije pogodan za tu svrhu: ogrjevno drvo, rovni ugljen, razni briketi izrađeni od biomase i – osobito – prirodni plin. Električnom energijom koristimo se opravdano u tehnološke toplinske svrhe jedino u slučajevima ako njezina primjena osigurava kvalitetu proizvoda

koju bi bilo nemoguće postići korištenjem kakvim drugim oblikom energije ili omogućuje znatno jednostavnije tehnološke postupke (elektrolučne ili indukcijske peći za proizvodnju visokokvalitetnog čelika, elektrolučno zavarivanje...).

Nije moguća opskrba vodnog i zračnog prometa električnom energijom iz elektroenergetskog sustava, a nije zamisliva niti opskrba cestovnog prometa električnom energijom izravno, kliznim priključkom na električnu mrežu (kakva se mogućnost koristi za elektrificiranu željeznicu, tramvaj ili podzemnu gradsku prometnu mrežu), a promet koristi oko 25 posto neposredno iskorištene energije.

Konačno, okolnost koja općenito i praktički ne ograničava korištenje električnom energijom ali ipak: postoji opasnost za zdravlje i život čovjeka te ugrožavanje imovine ako se električna energija ne koristi na propisani način, te su potrebne osobite zaštitne mjere pri korištenju električnom energijom – osobito kada se postrojenja, vodovi i instalacije podvrgavaju redovitom održavanju, intervencijama i popravcima. Životno i požarno opasna ali nevidljiva (baš ničim ne signalizira da li je što pod naponom ili isključeno), električna energija predstavlja fenomen kojeg se valja vrlo ozbiljno čuvati i najpažljivije ga koristiti. Pogrešan korak pri njezinu korištenju zna biti nepovratan i može biti fatalan!

## Zaključno o svojstvima električne energije

Teško je, između brojnih svojstava električne energije, izdvojiti najbitnija. Ipak, svojstva koja čine električnu energiju osobitom vrstom robe na tržištu su: istodobnost proizvodnje i potrošnje, neoznačivost njezina podrijetla u elektroenergetskom sustavu i nezamjenjivost u određenim područjima korištenja.

Istaknimo još jednom najvažnije i neraskidivo svojstvo električne energije: istodobnost proizvodnje i potrošnje – nemogućnost njezina uskladištavanja. U svakom trenutku mora ukupna proizvodnja biti jednaka ukupnoj potrošnji; to svojstvo ne sadrži nijedna druga roba na tržištu. Praktično sva druga roba se proizvodi uskladištava i onda koristi sukladno potražnji. A električna energija mora se proizvoditi u ritmu (otežano predvidljivom, u stanovitoj mjeri) potražnje. Potražnja električne energije ima vrlo naglašene oscilacije: po satima u jednom danu, po danima u jednom tjednu, po sezonama u jednoj godini, sve to – uz potpuno siguran porast tijekom godinâ. Tko će predvidjeti slučajnu naoblaku, nagli izostanak naoblake ili snažan vjetar sutrašnjeg dana, kakav iznenadni svjetski događaj koji će privući brojne televizijske gledatelje u nepredviđeno vrijeme, a ti i takvi nepredvidivi događaji imaju ulogu u naglom povećanju ili smanjenju potražnje električne energije. Cjelokupni elektroenergetski sustav mora biti dimenzioniran kako bi omogućio opskrbu i pri najvećoj istodobnoj potražnji, da bi u svim drugim prilikama zapravo bio podopterećen.

Elektroenergetski sustav zamislimo nadomještenim svojevrsnim rezervoarom u koji *sve* elektrane utiskuju energiju i iz kojega istodobno *svi* kupci-potrošači preuzimaju energiju. (Taj rezervoar je prijenosna mreža!) Pri tome sva energija čim uđe u rezervoar neobilježena je svojim podrijetlom, *neobojena* je. Proizvedeni kilovatsati u jednoj elektrani nisu ničim označeni. Kupci-potrošači ne znaju, niti mogu znati, čiju energiju fizikalno preuzimaju. Jedina je i potpuna fizikalna istina: svi kupci-potrošači zajedno preuzimaju energiju od svih elektrana zajedno, u svakom trenutku. To razlikuje električnu energiju od velike većine drugih roba na tržištu. Jedino su plin iz plinskog sustava i toplina iz centraliziranog toplin-

skog sustava koji ima više toplana, također neobilježeni. Za ostale robe na tržištu znamo ili možemo znati njihovo proizvodno podrijetlo.

Među mnogim neposredno korištenim oblicima energije postoji zamjenjivost, radi li se o iskorištenju u toplinskom obliku. Možemo se grijati ili kuhati na kruto gorivo, tekuće gorivo, plin, električnu energiju... Iskorištavamo li neposredno potrošenu energiju za mehanički rad, također ga je moguće ostvariti iz svih neposrednih oblika, manje ili više prikladno. Dakako, u svim tim slučajevima zamjene neposrednog energetskog oblika mora trošilo biti zamijenjeno ili mora biti izvorno prilagođeno alternativnom korištenju. Poput automobila, prilagođenog za pogon na plin ili benzin. Zgrada mora imati dimnjak kako bi bilo omogućeno grijanje ili kuhanje na neelektrični oblik neposredno iskorištene energije. Međutim, za rasvjetu (barem u današnjem poimanju rasvjete), za radio, televizor, računala te za sve druge elektroničke aparate, za suvremene telekomunikacije, brojne medicinske aparate, za elektrolizu..., apsolutno nije moguća zamjena električne energije nekim drugim oblikom energije. To su korištenja koja su se izvorno razvila upravo na primjeni električne energije – te je električna energija za njih nezamjenjiva. Nema li na raspolaganju električne energije – nema ni takvog korištenja, električna energija tu je nezamjenjiva. Kako razvoj donosi sve nove i nove takve primjene električne energije, tako se područje njezine nezamjenjivosti neprekidno širi.

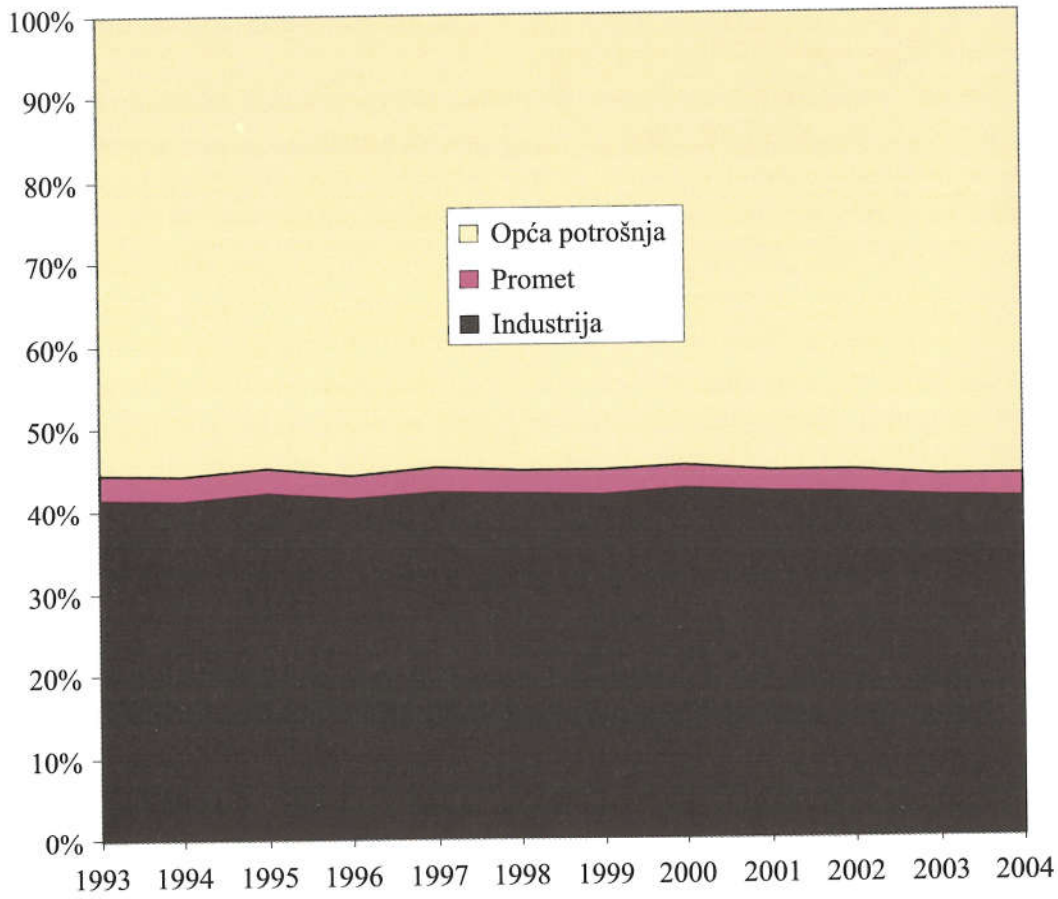
## Električna energija po glavnim sektorima potrošnje

Električna energija predaje se na korištenje iz elektroenergetskog gospodarstva. To je neposredno potrošena električna energija, netopotrošnja. Kupce-potrošače grupiramo u poznate glavne *sektore potrošnje* i prema tim sektorima iskazujemo neposredno potrošenu električnu energiju: industrija–promet–opća potrošnja. Opću potrošnju često i dalje dijelimo na potrošnju u kućanstvima i na ostalu potrošnju (kamo ubrajamo potrošnju poljoprivrede te javnih i privatnih usluga, komunalnu potrošnju, javnu rasvjetu, građevinarstvo i sl.).

U svijetu (2003), preko polovina električne energije (56%) utroši se u općoj potrošnji, 42,2 posto u industriji i 1,8 posto u prometu. Trideset godina ranije (1973), udjeli sektora bili su: industrija 51,3 posto, opća potrošnja 46,3 posto i promet 2,4 posto. Očigledno je u tom relativno dugom razdoblju, u svjetskim razmjerima došlo do preraspodjele između opće potrošnje i industrije; sve naglašeniji je udio usluga u svekolikim djelatnostima a raste i standard stanovništva u svijetu.

Opet su nam zanimljivija kretanja potrošnje električne energije po glavnim sektorima potrošnje u Europskoj Uniji i Hrvatskoj te usporedba ta dva kretanja. U Europskoj Uniji (EU-25) u posljednjem promatranom desetljeću (1993-2004) nije se dogodila značajnija promjena u udjelima potrošnje pojedinih glavnih sektora potrošnje, zatečeni udjeli na početku razdoblja naprosto stagniraju do kraja razdoblja – potrošnja se povećava ravnomjerno u svim sektorima. Udjeli su: opća potrošnja – oko 55 posto; industrija – oko 42 posto i promet – (preostalih) oko tri posto. U općoj potrošnji je naravno sadržana potrošnja kućanstava, slijede usluge i ostalo (slika 5.6).

U Hrvatskoj se udjeli sektora potrošnje bitno mijenjaju (slika 5.7). Industrija je 1990. godine imala udio od 44,2 posto, da bi 2005. pala na samo 22,7 posto. Kućanstva su imala udio 33,7 posto (1990), da bi njihov udio porastao na čak 44,0 posto (2005). Ostala

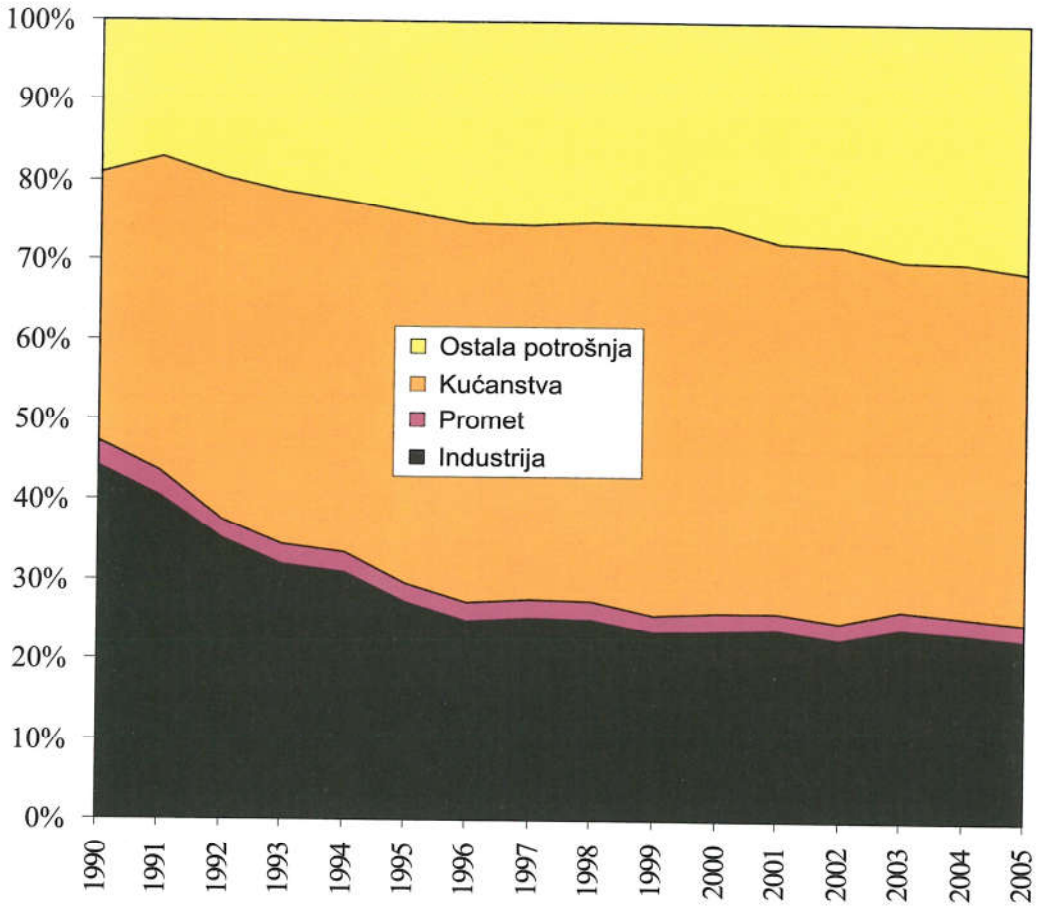



*Izvor: Eurostat*

*Slika 5.6. Udjeli sektora u netopotrošnji električne enrgije u EU-25*

potrošnja imala je udio 19,0 posto (1990), da bi to poraslo na 31,2 posto (2005). Konačno, promet je koristio 3,2 posto sveukupno utrošene električne energije (1990), da bi to palo na 2,1 posto (2005). Loša kretanja: drastičan pad udjela industrije i prometa te visok rast udjela kućanstava! Jedino je povoljno kretanje u ostaloj potrošnji – ostvaren je bitan rast njezina udjela, što je – ako je većim dijelom zasluga intenziviranja aktivnosti malog gospodarstva u materijalnoj sferi i uslugama – perspektivno kretanje. Radi li se većim dijelom o intenziviranju raznih neproizvodnih aktivnosti (trgovine, administracije), onda to nije osobit uspjeh za Hrvatsku.

Usporedimo li Hrvatsku s Europskom Unijom, najznačajniju razliku uočit ćemo u udjelu industrije: u Hrvatskoj ostvaruje se oko 23 posto a u EU-25 ostvaruje se 42 posto, gotovo dvostruko više! To je znak posvemašnje poslijeratne deindustrijalizacije i pretvorbe Hrvatske u zemlju trgovine tuđim dobrima, umjesto stvaranja svojih novih dobara.




*Izvor: Energetski institut Hrvoje Požar*

*Slika 5.7. Udjeli sektora u netopotrošnji električne enrgije u Hrvatskoj*

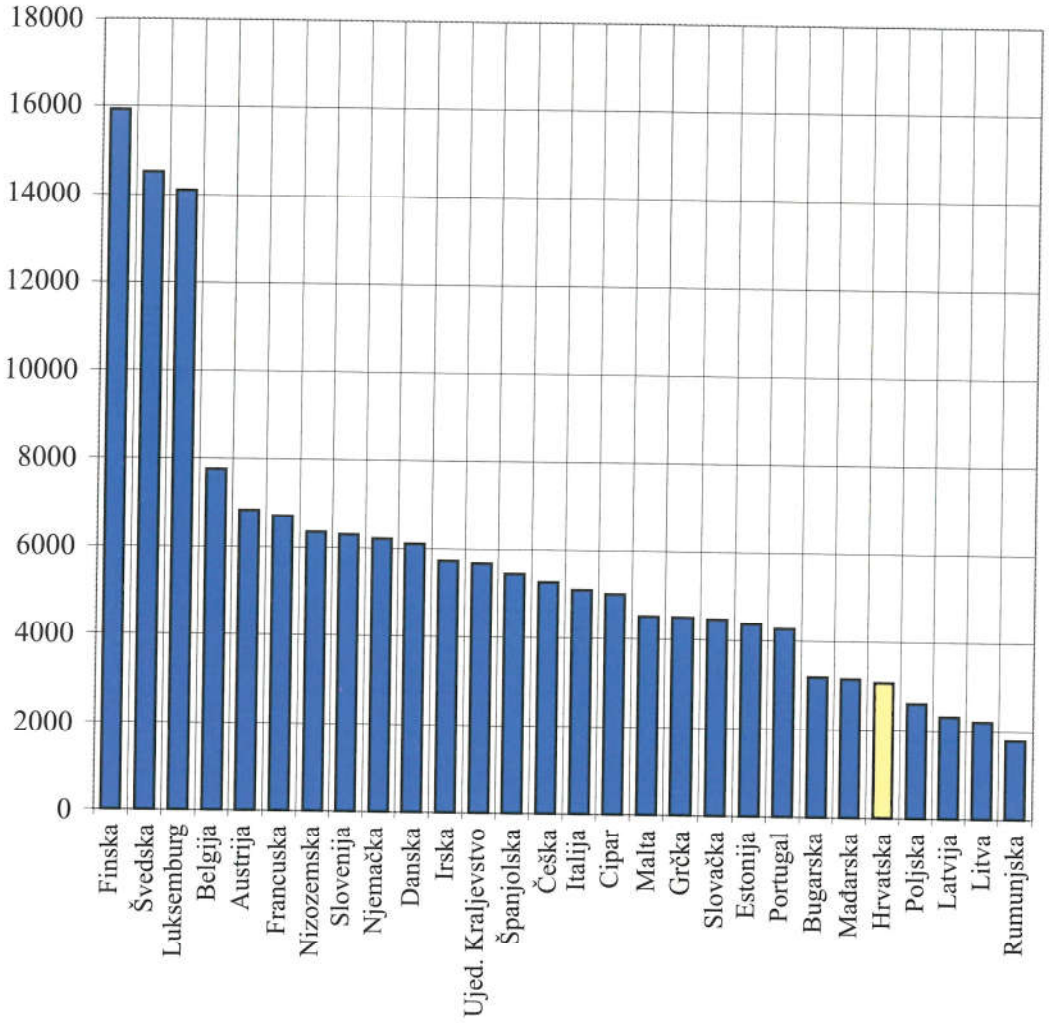
## Standard stanovnika iskazan potrošnjom električne energije

Neposredna potrošnja električne energije po stanovniku pojedine zemlje govori o tome s koliko je električne energije (iskorištene u industriji, prometu i općoj potrošnji – kućanstvima i ostaloj potrošnji) potpomognut prosječni stanovnik te zemlje. Raspolažemo s podacima o toj potrošnji u 2004. godini za sve zemlje Europske Unije, promatrane po 27 članica (EU-27) i Hrvatsku, prema statističkim podacima Eurostat. Podaci o tome prikazani su u tablici 5.1, u kojoj su iskazani i podaci o broju stanovnika pojedinih zemalja, kako ih procjenjuje Eurostat za 2004. godinu.

*Tablica 5.1. Stanovništvo, neposredna potrošnja električne energije, bruto domaći proizvod i učinkovitost električne energije u EU-27 i Hrvatskoj, 2004. godine*

| Zemlja | Stanovništvo (milijuna) | Neposredna potrošnja električne energije (GWh) | Neposredna potrošnja električne energije (kWh/stan.) | Bruto domaći proizvod – PKM (euro/stan.) | Učinkovitost električne energije (euro/kWh) |
|---|---|---|---|---|---|
| **EU-27** | **488,49** | **2650000** | **5425** | **21503** | **3,96** |
| Austrija | 10,40 | 55684 | 6841 | 27666 | 4,04 |
| Belgija | 7,80 | 80608 | 7753 | 26759 | 3,45 |
| Bugarska | 10,21 | 24877 | 3189 | 7134 | 2,24 |
| Cipar | 5,40 | 3663 | 5016 | 19648 | 3,92 |
| Češka | 82,53 | 53800 | 5269 | 16171 | 3,07 |
| Danska | 1,35 | 32971 | 6108 | 26772 | 4,38 |
| Estonija | 4,03 | 5896 | 4364 | 11978 | 2,74 |
| Finska | 11,04 | 83131 | 15926 | 24834 | 1,56 |
| Francuska | 42,35 | 415877 | 6709 | 24146 | 3,60 |
| Grčka | 61,98 | 49718 | 4503 | 18245 | 4,05 |
| Irska | 57,89 | 23062 | 5726 | 30414 | 5,31 |
| Italija | 0,73 | 295041 | 5097 | 23095 | 4,53 |
| Latvija | 2,32 | 5385 | 2322 | 9775 | 4,21 |
| Litva | 3,45 | 7618 | 2211 | 10981 | 4,97 |
| Luksemburg | 0,45 | 6373 | 14113 | 53978 | 3,82 |
| Mađarska | 10,12 | 31808 | 3144 | 13751 | 4,37 |
| Malta | 0,40 | 1803 | 4508 | 15988 | 3,55 |
| Nizozemska | 16,26 | 103123 | 6343 | 27946 | 4,41 |
| Njemačka | 8,14 | 513325 | 6220 | 24903 | 4,00 |
| Poljska | 38,19 | 99809 | 2613 | 10908 | 4,17 |
| Portugal | 10,47 | 44671 | 4265 | 16086 | 3,77 |
| Rumunjska | 21,71 | 38740 | 1784 | 7301 | 4,09 |
| Slovačka | 2,00 | 24028 | 4466 | 12196 | 2,73 |
| Slovenija | 5,38 | 12584 | 6303 | 17920 | 2,84 |
| Španjolska | 5,22 | 230669 | 5447 | 21658 | 3,98 |
| Švedska | 8,98 | 130361 | 14524 | 25865 | 1,78 |
| Ujedinjeno Kraljevstvo | 59,70 | 339015 | 5679 | 26455 | 4,66 |
| **Hrvatska** | **4,44** | **13642** | **3071** | **10426** | **3,39** |

*Izvor: Eurostat*




*Izvor: Eurostat*

*Slika 5.8. Netopotrošnja električne energije po stanovniku EU-25 i Hrvatske* (kWh/stan.)

Vidljivo je, kako je u EU-27 neposredna potrošnja električne energije po stanovniku 2004. godine bila 5 425 kWh, te da je zemlja s najvećom potrošnjom Finska (15 926 kWh) a s najmanjom potrošnjom po stanovniku Rumunjska (1 784 kWh), slika 5.8. Hrvatska je, prema istom izvoru podataka, ostvarila neposrednu potrošnju od 3071 kWh/stanovniku, dakle na razini 56,6 posto prosjeka EU-25. To govori kako je hrvatski stanovnik, prosječno, samo nešto više potpomognut električnom energijom od polovine one električne energije kojom je potpomognut prosječni stanovnik EU-27.

Godine postizanja neposredne potrošnje električne energije po stanovniku nekih europskih zemalja jednake postignutoj potrošnji električne energije po stanovniku u Hrvatskoj, 2004. godine, dakle oko 3 100 kWh, ukazuju na zaostajanje standarda hrvatskog stanovništva prema standardu stanovnika tih zemalja (tablica 5.2).

*Tablica 5.2. Godine postizanja neposredne potrošnje električne energije po stanovniku nekih europskih zemalja jednake postignutoj potrošnji električne energije po stanovniku u Hrvatskoj 2004. godine (otprilike* 3 100 kWh/stan.)

| Zemlja | Godina | Opaska |
|---|---|---|
| Norveška | Prije 1950. | Enorman udio hidroenergije! |
| Švedska | 1957. | |
| Švicarska | 1960. | |
| Ujedinjeno Kraljevstvo | 1964. | |
| Njemačka DR[48] | 1965. | Velik udio industrijske potrošnje! |
| Finska | 1966. | |
| SR Njemačka[49] | 1967. | |
| Austrija | 1969. | |
| Čehoslovačka[50] | 1969. | |
| Belgija | 1971. | |
| Nizozemska | 1971. | |
| Danska | 1972. | |
| Francuska | 1973. | |
| Bugarska | 1975. | |
| Poljska | 1976. | |
| Italija | 1978. | |

*Izvor: H. Požar, Snaga i energija u elektroenergetskim sistemima*

Dakako, to je pojednostavnjeno gledanje; nije veličina potrošnje električne energije po stanovniku neke zemlje mjera koja bi a priori utvrđivala rang standarda njezina stanovništva, potrošnja ovisi o udjelu industrije u gospodarstvu te zemlje, osobito elektroenergetski intenzivne industrije, o prirodnim datostima da se prirodni izvori energije naglašenije koriste za preobrazbu u električni oblik energije – pa tek u tom obliku koriste, o korištenju električne energije za zagrijavanje (Finska, Švedska), o stupnju elektrificiranih željeznica... Ipak, u prosječnim prilikama, i to je univerzalna fizička mjera (a ne teže usporediva: novčana mjera) civiliziranosti i općeg postignuća jedne zemlje te blagodati što je uživaju njezini stanovnici.

Hrvatska se 2004. godine nalazi četrdesetak godina nakon srednjih u toj skupini zemalja, ili tridesetak godina nakon zemalja na začelju te skupine!

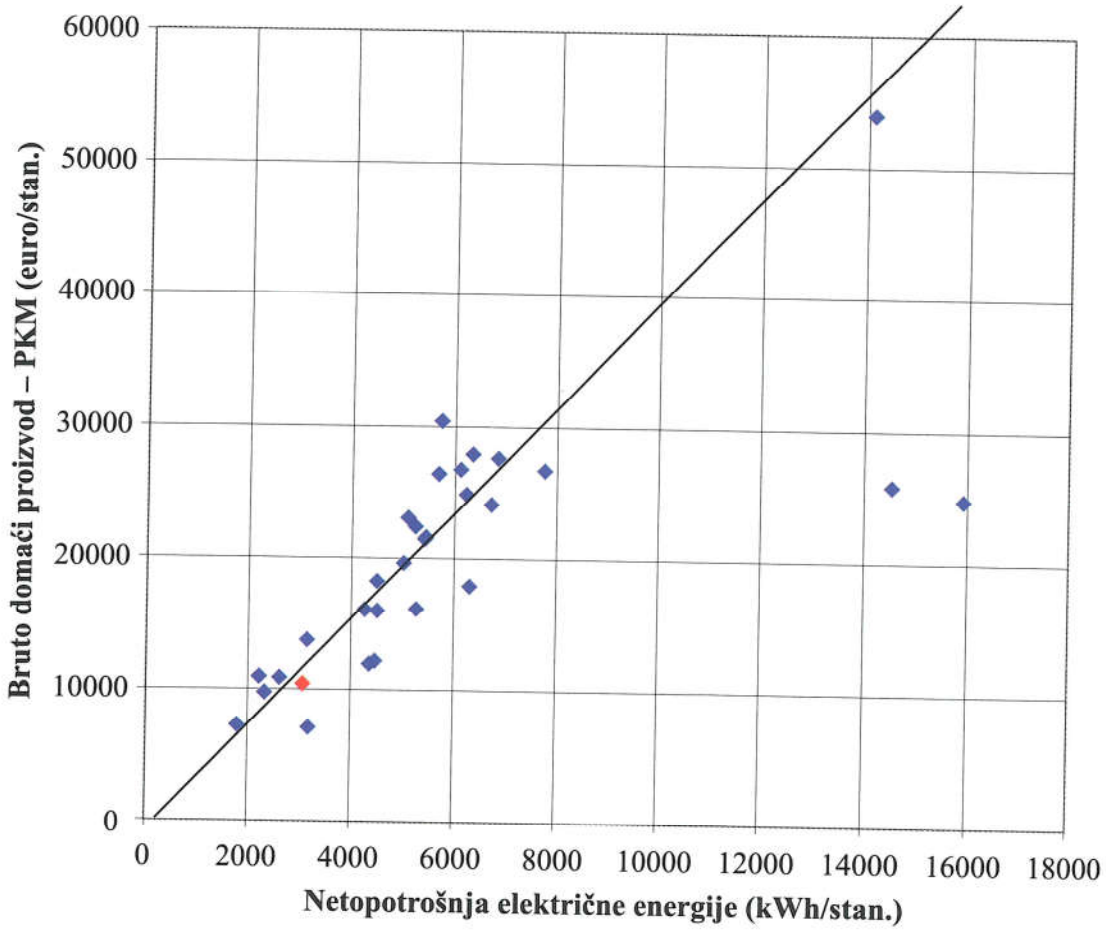
## Bruto domaći proizvod i potrošnja električne energije

Cjelovitiji uvid u gospodarstvo jedne zemlje pruža bruto domaći proizvod po stanovniku te zemlje; na slici 5.9. prikažimo korelaciju bruto domaćeg proizvoda i neposredne potrošnje električne energije po stanovniku u 2004. godini prema podacima iz tablice 5.1. Prikazane su sve zemlje članice EU-27 a crveno je označen položaj Hrvatske.

48 Njemačka Demokratska Republika, prije njemačkog ponovnog ujedinjenja, koje se zbilo 3. 10. 1990

49 Savezna Republika Njemačka, prije njemačkog ponovnog ujedinjenja, koje se zbilo 3. 10. 1990

50 Prije razdruživanja u Češku i Slovačku, koje se zbilo 1. 1. 1993.




*Izvor: Eurostat (položaj Hrvatske: crveno)*

*Slika 5.9. Bruto domaći proizvod i netopotrošnja električne energije po stanovniku EU-25 i Hrvatske 2004. godine*

U tablici 5.1. bruto domaći proizvod je iskazan paritetom kupovne moći (PKM) njezina stanovništva (a ne primjenom službenog tečaja eura prema domaćoj valuti). Taj se paritet neke valute određuje tako da se za kupnju standardizirane košare roba utvrdi koliko novca u domaćoj valuti treba platiti pa se onda utvrdi koliko bi ta ista košara koštala u nekoj izabranoj drugoj zemlji, iskazano u nekoj univerzalnoj valuti (u Europi u eurima). Omjer između ta dva iznosa daje paritet univerzalne valute prema kupovnoj moći valute promatrane zemlje (dakle euro/kuna, za Hrvatsku). Taj se paritet utvrđuje za sve zemlje, osim za izabranu zemlju, za koju je on jednak jedinici. Iskazivanje bruto domaćeg proizvoda paritetom kupovne moći tako daje realniju sliku odnosa među zemljama od primjene službenog tečaja za domaću valutu.

Evidentna je korelacija bruto domaćeg proizvoda i potrošnje električne energije: povećanje jednog pokazatelja povezano je s povećanjem drugog pokazatelja. Ali, vidljiva su i odstupanja od nekakve srednje korelacijske linije (crta, recimo, usmjerena iz ishodišta prema Luksemburgu). Švedska i Finska koriste električnu energiju i za zagrijavanje, stoga *izlaze* izvan srednje korelacijske linije. (Da je prikazan i Island – bogat vrućim izvorima – i Norveška – prebogata hidroenergijom – pa se stanovništvo u tim zemljama također grije na električnu energiju, te dvije zemlje još više bi odstupale od srednje korelacijske linije.) Ostale zemlje nalaze se sve

u blizini srednje korelacijske linije – dakle, doista: bruto domaći proizvod po stanovniku u gotovo čvrstoj je vezi s korištenjem električnom energijom po stanovniku!

Godišnji rast bruto domaćeg proizvoda općenito je nužno povezan s godišnjim rastom potrošnje električne energije. Iskustvo je, da zemlje na nižem razvojnom stupnju imaju veći porast potrošnje električne energije od porasta bruto domaćeg proizvoda, a zemlje na višem razvojnom stupnju imaju manji porast potrošnje električne energije od porasta bruto domaćeg proizvoda. To je razumljivo; zemlje u razvoju moraju ostvarivati porast električne energije i u neproduktivne svrhe (primjerice za javnu rasvjetu, škole, zdravstvo) a proizvode energetski intenzivne proizvode. Razvijene zemlje to su ostvarile u ranijim razvojnim etapama i imaju dovoljno sredstava za uvođenje najučinkovitije tehnologije a proizvode svoje proizvode na najvišem stupnju prerade i pružaju usluge koje su visoko dohodovne a energetski neintenzivne. Ilustrativan za to je primjer Njemačke, tablica 5.3.

*Tablica 5.3. Prosječni godišnji rast realnog bruto domaćeg proizvoda i prosječni godišnji rast potrošnje električne energije u Njemačkoj (%)*

| Razdoblje | Rast realnog BDP | Rast potrošnje el. energije |
|---|---|---|
| 1950-1960 | 8,2 | 10,0 |
| 1960-1970 | 4,4 | 7,4 |
| 1970-1980 | 2,7 | 4,1 |
| 1980-1990 | 2,3 | 1,8 |
| 1991-2001 | 1,5 | 0,7 |

*Izvor: www.strom.de/5.9.2002*

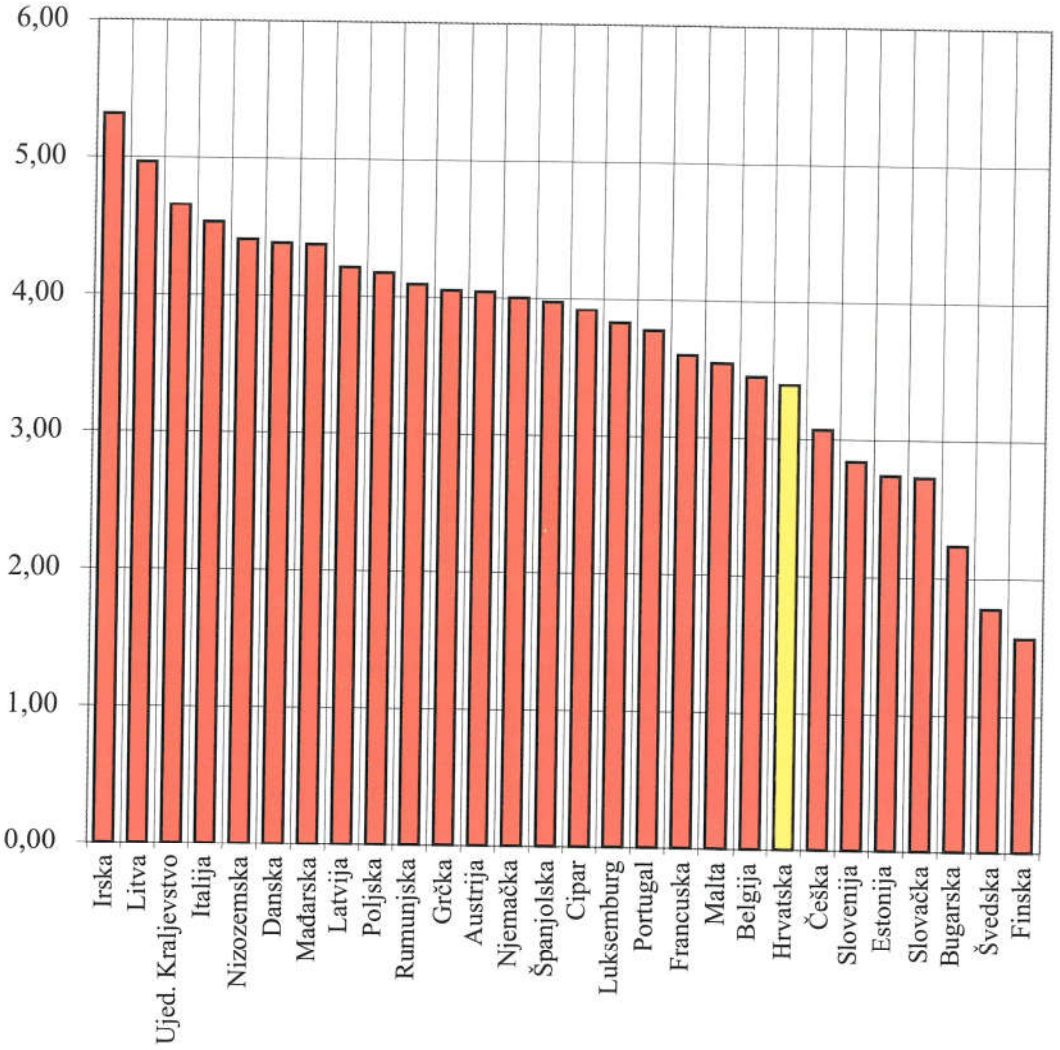
Tu je do 1990. godine promatrana samo zapadna Njemačka, dotadašnja Savezna Republika Njemačka, a od 1991. godine ujedinjena Njemačka.

## Elektroenergetska učinkovitost

Elektroenergetska učinkovitost pojedine zemlje utvrđuje se kao omjer bruto domaćeg proizvoda te zemlje i neposredne potrošnje električne energije u toj zemlji[51]. Govori, dakle: koliko se novčanih jedinica nove vrijednosti ostvaruje ulaganjem jedinice električne energije (euro/kWh) u toj zemlji. Prema podacima iz tablice 5.1, na slici 5.10. prikazana je energetska učinkovitost zemalja EU-27 i Hrvatske u 2004. godini.

Imamo skupinu zemalja koja je elektroenergetski učinkovitija od drugih: više jedinica bruto domaćeg proizvoda proizvedu uz manji utrošak električne energije. To su: Irska, Litva, Ujedinjeno Kraljevstvo, Italija Nizozemska, Danska i Mađarska. Ima i zemalja koje ostvaruju visok BDP po stanovniku, ali i visoku potrošnju električne energije, Švedska i Finska. Zemlje s prosječnom elektroenergetskom učinkovitošću su: Grčka, Austrija i Njemačka. U njima je ostvareno približno četiri eura bruto domaćeg proizvoda po svakom utrošenom kilovatsatu 2004. godine, otprilike kao i u svim zemljama EU-27, uzetih zajedno.

[51] Često se promatra i obrnuti omjer: neposredne potrošnje električne energije i bruto domaćeg proizvoda. Taj omjer kaže koliko je električne energije uloženo za jedinicu bruto domaćeg proizvoda u toj zemlji. Jednak je recipročnoj vrijednosti elektroenergetske učinkovitosti i naziva se *elektroenergetska intenzivnost*.




*Izvor: Eurostat*

*Slika 5.10. Elektroenergetska učinkovitost zemalja EU-25 i Hrvatske 2004. godine* (euro/kWh)

Hrvatska je te godine ostvarila oko 3,4 eura/kWh. To nije loše – usluge nam očigledno dobro pridonose bruto domaćem proizvodu (iskazanim paritetom kupovne moći!). Moramo poraditi na tome kako bismo još više skupocjenije proizvodnje i usluga ostvarili po svakom uloženom kilovatsatu. Previsok udio kućanstava u neposrednoj potrošnji (44 posto), ne vuče u tom smjeru, jer kućanstva praktički ne pridonose bruto domaćem proizvodu. Hrvatska troši dosta električne energije spram potrošnje drugih oblika energije (udio je 20 posto u svim neposrednim oblicima, poput Europske Unije!), ali po stanovniku zapravo premalo (nešto više od polovine potrošnje po stanovniku u Europskoj Uniji), no svejedno treba je koristiti još razumnije i učinkovitije! Razmotriti bi trebalo, primjerice, mogućnosti povezivanja visine društvenih obveza ili olakšica s dohodovnom (elektro)energetskom učinkovitošću.

# Sigurnost opskrbe električnom energijom

Kuhalo kave, dizalo u zgradi, računalo u uredu, bezbrojni strojevi u tvornicama, ulična i kućna rasvjeta ... Sve staje ako nestane napajanja električnom energijom. Sigurna opskrba energijom[52] je stoga najvažniji energetsko-politički cilj suvremenih društava. Sigurna opskrba električnom energijom postiže se pravodobnom izgradnjom elektrana dovoljne raspoložive snage, kao i pouzdanom prijenosnom i distribucijskom mrežom, koja će dopremiti vlastitu proizvedenu ili uvozom dobavljenu električnu energiju do kupaca-potrošača.

Mreže moraju biti tako oblikovane kako bi uvijek moguć prekid napajanja električnom energijom (posljedica neizbježnih neispravnosti koje se uvijek mogu iznenada javiti) svele na najmanji mogući geografski prostor. Elektrane moraju biti što pouzdanije pri svome korištenju, ali prijenosna mreža je ta koja mora moći podnijeti jednokratne a iznenadne zastoje elektrana, bez poremećaja u napajanju svojih čvorišta električnom energijom.

Prekid napajanja električnom energijom uzrokuje štete kod pogođenih potrošača-kupaca, koje je često teško iskazati novcem. Najčešće se uzima da prekid napajanja izaziva štetu u bruto domaćem proizvodu, razmjernu omjeru godišnjeg bruto domaćeg proizvoda i neposredne potrošnje električne energije u nekoj zemlji. Dakle, uzima se da svaki isporučeni kilovatsat pridonosi jednako bruto domaćem proizvodu, pa onda i svaki neisporučeni kilovatsat donosi i toliku nepovratnu štetu. Stoga se novčana vrijednost neisporučene električne energije iskazuje kao omjer bruto domaćeg proizvoda jedne zemlje i godišnje netopotrošnje električne energije u toj zemlji. Dakako, šteta se može iskazivati i u odnosu na pojedine kupce-potrošače: kolik je njihov poslovni gubitak ako se obustavi napajanje električnom energijom, pa čak ovisno o trajanju tog prekida napajanja.

Prekidi napajanja električnom energijom iskazuju se tzv. sistemskim minutama, to je godišnje trajanje, iskazano minutama, u kojem bi se ostvarila neisporuka sve neisporučene energije uz vršno opterećenje elektroenergetskog sustava (dakle kao da je pri vršnom opterećenju toliko trajao potpuni *mrak*), kao što je u stvarnosti neisporučeno ali uz raznolika opterećenja i raznolika trajanja te neisporuke. Te su sistemske minute bile u 2004. godini: u Njemačkoj – 23 minute, u Francuskoj – 60 minuta, u Ujedinjenom Kraljevstvu – 87 minuta i u Italiji – 91 minuta. Samo u prijenosnoj mreži Hrvatske ostvareno je u toj godini 26 minuta, a u 2005. godini 13 minuta, ali tome bi trebalo dodati, višestruko veće, sistemske minute ostvarene u distribucijskoj mreži.

---

[52] Opskrba i napajanje električnom energijom donedavno su smatrani sinonimima. U najnovijem elektroenergetskom rječniku činimo nužnu razliku tih pojmova. *Napajanje* električnom energijom je osigurano ako je priključak kupca-potrošača pod naponom, spreman da se koristi. *Opskrba* električnom energijom osigurana je ako je prisutno napajanje i ispunjene komercijalne okolnosti (npr. u roku plaćena potraživanja opskrbljivača), pa opskrba može biti obustavljena, neovisno o tome što je osigurano napajanje.

# Sadašnja proizvodnja i potrošnja električne energije u Europi

Kako bismo ilustrirali ukupno sadašnje korištenje električnom energijom u Europi, prikažimo netoproizvodnju električne energije i brutopotrošnju električne energije u zemljama Europske Unije i ostalim europskim zemljama, ostvarene 2005. godine, kako te podatke donosi Eurelectric, tablica 5.3. Radi iskaza ukupno raspoložive električne energije u pojedinoj zemlji, dodaju se podaci o uvozu i izvozu električne energije.

Ukupno je u Europi (bez Albanije, Bjelorusije, Moldavije, Ukrajine, te bez europskog dijela Rusije i malih europskih državica) u 2005. godini proizvedeno 3 570 TWh električne energije, od toga u zemljama EU-25 nešto više od 3 000 TWh. Zemlje s najvećom proizvodnjom su Njemačka i Francuska, u te dvije zemlje ukupno se proizvede više od 1/3 proizvodnje u EU-25. Zemlje s velikim uvozom su Italija i Njemačka, no u Njemačkoj prevladava još veći izvoz, tako da je suficitarna, a Italija je naglašeno deficitarna. Najveći izvoznik u 2005. godini bila je Njemačka – ali uz istodobno vrlo velik uvoz, tako da je Francuska bila apsolutno najveći netoizvoznik; izvozi gotovo 11 posto svoje netoproizvodnje. (Zanimljivo: Francuska je apsolutno najveći neto-izvoznik, a Italija najveći neto-uvoznik električne energije u čitavom svijetu!)

Promatra li se saldo uvoza i izvoza, izlazi kako je među najvećim relativnim uvoznicima u 2005. godini bila Hrvatska. Te je godine netouvoz iznosio čak 30 posto brutopotrošnje električne energije, dakle gotovo svaki treći kilovatsat je uvezen. To nikako nije dobro, na dulji rok gledano. Čak je Italija, najveći europski netouvoznik električne energije, dva puta manje od nas postotno ovisna o uvozu. U 2005. godini Talijani su uvezli 14,9 posto svoje brutopotrošnje.

Ukupan uvoz u sve i ukupan izvoz iz svih promatranih europskih zemalja praktički su izjednačeni, na razini od oko 350 TWh. Što se negdje izvozi, drugdje se uvozi! Time je i ukupno raspoloživa energija na razini Europe, praktički izjednačena s netoproizvodnjom.

Predmet uvozno-izvoznih aktivnosti je oko 10 posto ukupne netoproizvodnje električne energije i to se iz godine u godinu uvećava – ekonomski motivi naglašeno potiču na takav smjer kretanja. Jedino je, od velikih, Italija – prvenstveno fizički a ne komercijalno – naprosto okrenuta uvozu (jer je svojedobno zaustavljeno korištenje nuklearnim elektranama u toj zemlji) a Francuska izvozu (jer ogromni park svojih nuklearnih elektrana na taj način ravnomjernije i potpunije koristi, izvozom ponajviše u Italiju i Ujedinjeno Kraljevstvo).

Brutopotrošnja električne energije na razini Europe razlikuje se od raspoložive energije za pedesetak teravatsati, toliko je energije utrošeno za crpljenje 2005. godine u crpnom radu europskih crpno-akumulacijskih hidroelektrana.

*Tablica 5.4. Proizvodnja i potrošnja električne energije u europskim zemljama 2005. godine* (TWh)

| Država | Netoproizvodnja (TWh) | Uvoz (TWh) | Izvoz (TWh) | Raspoloživo (TWh) | Brutopotrošnja (TWh) | (Uvoz-Izvoz)/ /Brutoptrošnja (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Austrija | 63,8 | 20,4 | 17,7 | 66,5 | 63,0 | 4,3 |
| Belgija | 82,9 | 14,3 | 8,0 | 89,2 | 88,2 | 7,1 |
| Cipar | 4,3 | 0,0 | 0,0 | 4,3 | 4,1 | 0,0 |
| Češka | 76,2 | 12,4 | 25,0 | 63,6 | 62,7 | -20,1 |
| Danska | 33,8 | 13,4 | 12,1 | 35,1 | 35,2 | 3,7 |
| Estonija | 9,2 | 0,3 | 2,1 | 7,4 | 7,4 | -24,3 |
| Finska | 67,8 | 17,9 | 0,9 | 84,8 | 84,9 | 20,0 |
| Francuska | 549,2 | 0,0 | 60,2 | 489,0 | 482,4 | -12,5 |
| Grčka | 55,4 | 5,6 | 1,8 | 59,2 | 58,4 | 6,5 |
| Irska | 25,0 | 2,1 | 0,0 | 27,1 | 26,5 | 7,9 |
| Italija | 288,7 | 50,2 | 1,1 | 337,8 | 329,4 | 14,9 |
| Latvija | 4,6 | 5,1 | 2,9 | 6,8 | 6,8 | 32,4 |
| Litva | 13,6 | 1,1 | 4,1 | 10,6 | 10,1 | -29,7 |
| Luksemburg | 4,1 | 6,4 | 3,2 | 7,3 | 6,2 | 51,6 |
| Mađarska | 32,6 | 15,0 | 8,8 | 38,8 | 38,8 | 16,0 |
| Malta | 2,3 | 0,0 | 0,0 | 2,3 | 2,3 | 0,0 |
| Nizozemska | 96,3 | 23,7 | 5,4 | 114,6 | 114,7 | 16,0 |
| Njemačka | 581,3 | 53,4 | 61,9 | 572,8 | 563,5 | -1,5 |
| Poljska | 145,0 | 5,0 | 16,2 | 133,8 | 130,6 | -8,6 |
| Portugal | 46,1 | 7,5 | 0,7 | 52,9 | 52,1 | 13,1 |
| Slovačka | 29,0 | 4,5 | 7,2 | 26,3 | 26,2 | -10,3 |
| Slovenija | 14,1 | 7,2 | 7,6 | 13,7 | 13,7 | -2,9 |
| Španjolska | 279,5 | 10,1 | 11,5 | 278,1 | 271,6 | -0,5 |
| Švedska | 154,7 | 14,6 | 22,0 | 147,3 | 147,3 | -5,0 |
| Ujedinjeno Kraljevstvo | 379,6 | 11,3 | 0,8 | 390,1 | 386,6 | 2,7 |
| **EU-25** | **3 039,1** | **301,5** | **281,2** | **3 059,4** | **3 012,7** | **0,7** |
| Bosna i Hercegovina | 12,8 | 1,0 | 2,6 | 11,2 | 11,1 | -14,4 |
| Bugarska | 40,1 | 0,8 | 8,4 | 32,5 | 32,0 | -23,8 |
| Hrvatska | 11,7 | 8,6 | 3,6 | 16,7 | 16,7 | 29,9 |
| Island | 8,7 | 0,0 | 0,0 | 8,7 | 8,7 | 0,0 |
| Makedonija | 6,5 | 1,6 | 0,0 | 8,1 | 8,1 | 19,8 |
| Norveška | 137,6 | 3,7 | 15,7 | 125,6 | 125,6 | -9,6 |
| Rumunjska | 54,0 | 1,6 | 4,5 | 51,1 | 51,9 | -5,6 |
| Srbija i Crna Gora | 39,5 | 1,2 | 2,6 | 38,1 | 37,1 | -3,8 |
| Švicarska | 60,7 | 30,0 | 31,1 | 59,6 | 60,1 | -1,8 |
| Turska | 156,0 | 0,6 | 1,8 | 154,8 | 154,8 | -0,8 |
| **EU-25 + ostali** | **3 566,7** | **350,6** | **351,5** | **3 565,8** | **3 518,8** | **0,0** |

*Izvor: Eurelectric*

# 6

# Proizvodnja električne energije – elektrane

Električna energija proizvodi se u elektranama. Elektrane su postrojenja u kojima se neki prirodni ili pretvorbeni oblik energije pretvara (preobražava, preoblikuje, transformira) u električnu energiju. Proizvodnju električne energije trebali bismo zapravo, precizno govoreći, zvati pretvorbom nekog oblika energije u električni oblik, a odgovarajuća postrojenja – postrojenjima za pretvorbu u električni oblik energije. Međutim, tradicionalno govorimo o proizvodnji električne energije i elektranama. Ranije je korišten i naziv *električne centrale*, a još ranije (u nas) *munjare*[53], postrojenja za proizvodnju *munjine, munjiva.*

Elektrane služe za masovnu proizvodnju električne energije kojom se napajaju električne mreže, prenoseći i distribuirajući tu električnu energiju do svakoga kupca-potrošača. Elektrane mogu biti manjih snaga (nekoliko desetaka megavata), srednjih snaga (par stotina megavata; ta granica nije čvrsta, za velike elektroenergetske sustave je par stotina megavata srednja veličina, a za male sustave to je već velika mjera) i velikih snaga (od nekoliko stotina megavata pa do nekoliko tisuća megavata).

Međutim, proizvodnja električne energije obavlja se i u manjim postrojenjima, povezanim ili čak nepovezanim s elektroenergetskim sustavom. To su, primjerice, raznoliki industrijski i kućni (dizelski ili benzinski) agregati za proizvodnju električne energije, neizbježni agregati za proizvodnju električne energije u nuždi – koji se angažiraju kada izostane opskrba iz javne električne mreže, a opskrba je nužna i u takvim prilikama (bolnice, razni komunikacijski i informatički centri, tehnološki procesi koji ne trpe prekid napajanja električnom energijom), agregati za privremenu opskrbu gradilišta... sve do malih prijenosnih ili prijevoznih agregata koji se primjenjuju u raznim javnim i osobnim prilikama.

Proizvodnja električne energije, *u malome*, ali na doista beskrajno mnogo mjesta koja nas svakodnevno okružuju, obavlja se i nepovratnom pretvorbom kemijske energije u električni oblik u elektrokemijskim člancima, baterijama. Baterije služe za napajanje električnom energijom raznovrsnih uređaja čija je potrošnja električne energije mala, a otežan je ili praktički nemoguć priključak na javnu električnu mrežu. To su primjerice uređaji za stimulaciju rada srca, slušni aparati, ručni i prijenosni satovi, prijenosni radioaparati, prijenosne baterijske svjetiljke i nebrojeno mnogo drugih uređaja. Baterije mogu biti punjive, najbolji primjer za njih su one korištene danas masovno u mobitelima. Punjive baterije većeg sadržaja energije nazivaju se akumulatori (npr. one korištene u automobilima), a više njih spojenih u jednu cjelinu radi većeg ukupnog napona, nazivaju se akumulatorske baterije.

Električni akumulatori su danas praktički jedino masovno sredstvo za relativno jednostavnu pretvorbu električne energije u kemijski oblik i korištenje tom akumuliranom energijom, sukladno potrebama, obrnutom pretvorbom kemijskog oblika u električni[54].

[53] Podloga takvu nazivanju na hrvatskom vjerojatno je u *Hrvatsko-njemačko-talijanskom rječniku* Bogoslava Šuleka iz 1874. godine, gdje on kaže *munjina, munjivo*, za elektricitet. Ili u mađarskom jeziku; tamo je munja = *villam*, električan = *villamos*, elektricitet = *villamossag*. Elektrana je na mađarskom *villanytelep*. Doslovno: „naseobina munjine".

[54] Uz stupanj djelovanja te pretvorbe električne energije ponovno u električnu energiju olovnim akumulatorom do, po prilici, 75 posto.

Primjerice, sve brojniji u primjeni, sustavi su za besprekidno napajanje, koje tvori ispravljač (izmjenične struje u istosmjernu)-akumulatorska baterija-pretvarač (istosmjerne struje u izmjeničnu), kojima se osigurava opskrba električnom energijom trošila osjetljivih na prekid napajanja (računala, telekomunikacijskih i sličnih uređaja) kada izostane napajanje iz javne električne mreže. Akumulatori su tako tehnološki razvijeni da takvo ritmičko punjenje i pražnjenje mogu podnositi i preko desetak godina. Međutim, mana im je ta što mogu akumulirati ipak vrlo ograničene količine električne energije. Za iole veće količine, akumulatori bi bili prevelike mase[55], prevelikog volumena i time nedostižne cijene. Ekonomski i tehnički, danas još nije riješeno masovno akumuliranje električne energije.

Ovdje ćemo se naglašenije baviti elektranama za napajanje električnom energijom javnih električnih mreža, a manje spomenutim postrojenjima za pretvorbu u električnu energiju manjih ili čak sporadičnih veličina u odnosu prema veličinama s kojima barata javna elektroenergetika.

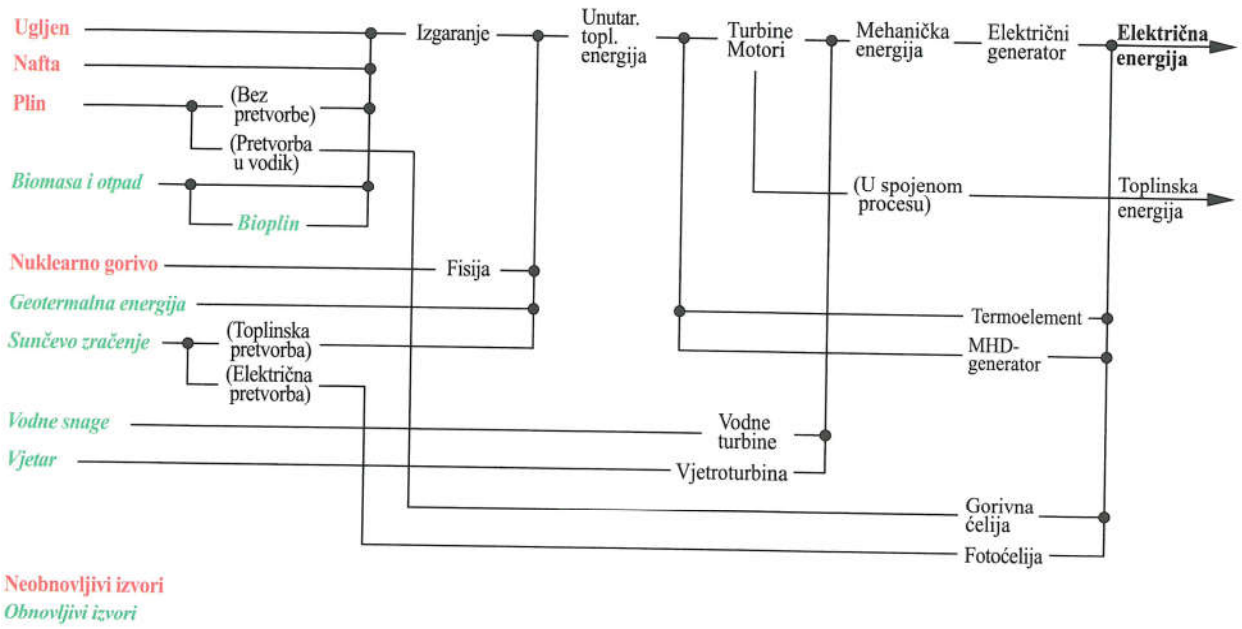
Proizvodnja električne energije, ali – danas – u relativno malim količinama, rješava se i primjenom fotonaponskih ćelija (fotoelektričnih ćelija, fotoćelija), gorivnih ćelija i termoelemenata. Ovdje se radi o izravnoj pretvorbi energije Sunčeva zračenja u električnu energiju (fotoćelijama) ili o izravnoj pretvorbi kemijske energije vodika u električnu energiju, bez izgaranja (gorivne ćelije) te o izravnoj pretvorbi topline u električnu energiju (termoelementi). Termoelementi se praktički danas koriste jedino za posredno mjerenje temperature električnim putem, jer je napon termoelementa izravno ovisan o temperaturi termoelementa, no uz neznatnu količinu proizvedene električne energije. U magnetohidrodinamskom generatoru (MHD-generator) izravno se pretvara kemijska energija goriva, njegovim izgaranjem pri vrlo visokoj temperaturi, u električnu energiju.

Na slici 6.1. prikazane su neke mogućnosti pretvorbe prirodnih oblika energije u električnu energiju. *Lanac s najviše karika* pretvorbe je onaj u kojem se izgaranjem goriva pretvara kemijska energija goriva u unutarnju toplinsku energiju plinova izgaranja, u parnom kotlu (radi li se o parnoj elektrani), ta se energija pretvara u unutarnju toplinsku energiju vodene pare, da bi u turbini bila pretvorena u kinetičku energiju te u rotacijsku mehaničku energiju, kojom se pogoni električni generator u kojem se zbiva *posljednja karika,* konačna pretvorba u električnu energiju. Sličan lanac pretvorbe zbiva se pri korištenju nuklearnim gorivom, tu ulogu parnog kotla preuzima nuklearni reaktor.

Izostavljanjem parnog kotla te izgaranjem goriva neposredno na ulazu u turbinu ili u motoru s unutrašnjim izgaranjem dobiva se donekle skraćen lanac pretvorbe. Takvo je također i korištenje Sunčevim zračenjem na toplinski način ili geotermalnom energijom.

Vodne turbine i vjetroturbine pretvaraju izravno prirodnu energiju vodnih snaga ili vjetra u rotacijsku mehaničku energiju, proces u termoelementima i MHD-generatorima omogućuje preobrazbu unutarnje toplinske energije u električnu energiju bez posredovanja rotiranog generatora, a proces u gorivnim ćelijama i fotoćelijama – pored izostavljanja generatora – omogućuje još i izravnu pretvorbu vodika i Sunčeva zračenja u električnu energiju. No, važno: vodik nije prirodni izvor energije, njega treba proizvesti iz kakva prirodnog izvora (često prirodnog plina) uz utrošak energije pri tome, tako da je energetski sadržaj dobivena vodika manji od energetskog sadržaja uložena prirodnog plina.

[55] Olovni akumulatorski članak mase 1 kilograma može akumulirati oko 10-30 Wh električne energije, ovisi o konstrukciji. Dakle, za akumuliranje 1 kilovatsata potrebna je masa akumulatora od 30 kg -100 kg.




*Slika 6.1. Neke pretvorbe prirodnih oblika energije u električnu energiju*

## Podjela elektrana na vrste

Elektrane se dijele prema vrsti prirodnih oblika energije i vrsti pretvorbe energije u električnu energiju na:

- konvencionalne termoelektrane
- nuklearne elektrane (uobičajena kratica: NE)
- (velike) hidroelektrane (HE)
- elektrane na nekonvencionalne izvore energije.

Često se koristi zajednički naziv za skupinu od prve tri vrste elektrana (konvencionalne termoelektrane, nuklearne elektrane i velike hidroelektrane): *konvencionalne elektrane*, za razliku od posljednje vrste koja bi se tada mogla nazvati nekonvencionalne elektrane.

Konvencionalne termoelektrane (nazivaju se još i elektrane na fosilna goriva) su:

- parne termoelektrane (TE)
- termoelektrane-toplane (TE-TO)
- plinsko-turbinske termoelektrane (PTE) i plinsko-turbinske termoelektrane-toplane
- plinsko-parne termoelektrane, kombi-termoelektrane (KTE) i plinsko-parne termo-elektrane-toplane.

Elektrane na nekonvencionalne izvore energije (danas uobičajenije raspoložive) su:

- elektrane na biomasu, bioplin i otpad
- geotermalne elektrane
- male hidroelektrane (u pravilu: snage do uključivo 10 MW)
- vjetroelektrane
- sunčane elektrane.

Elektrane na biomasu, bioplin i otpad (to su tzv. nekomercijalna goriva), donekle i geotermalne elektrane, načelno su jednake konvencionalnim termoelektranama, uz stanovite prilagodbe svojstvena pojedinoj vrsti goriva odnosno prirodnog oblika energije.

Moguća godišnja proizvodnja električne energije svih konvencionalnih temoelektrana, nuklearnih elektrana, elektrana na biomasu, bioplin i otpad, te geotermalnih elektrana može se utvrditi tako da se njihova raspoloživa snaga pomnoži s mogućim godišnjim trajanjem njihova angažmana. To je trajanje jednako broju godišnjih sati (8 760 sati), umanjenom za predvidivo godišnje trajanje remonta (i planiranih zastoja općenito) $T_r$ i vjerojatno godišnje trajanje prisilnih zastoja $T_z$. Dakle moguća godišnja proizvodnja električne energije takvih elektrana je

$$E_m = P_r \cdot (8760 - T_r - T_z) \qquad (6.1)$$

gdje je $P_r$ raspoloživa snaga elektrane, jednaka nazivnoj snazi elektrane ili nekoj manjoj zbog kakva tekuća ograničenja. Podrazumijeva se da je gorivo za elektranu apsolutno raspoloživo cijele godine. Ako nije, onda treba od godišnjeg trajanja odbiti i trajanje neraspoloživosti goriva. Ta teorijski moguća proizvodnja u pravilu neće biti ostvarena jer se elektrana angažira ovisno od cijene njezine proizvodnje i ritma potražnje električne energije u elektroenergetskom sustavu na koji je priključena.

Moguća godišnja proizvodnja elektrana na nestalne prirodne izvore energije: velikih i malih hidroelektrana, vjetroelektrana i sunčanih elektrana može se sagledavati samo statistički, na temelju višegodišnjeg simuliranja njihova pogona uz statistički registrirane dotoke vode i vjetra ili osunčanja, iz prošlosti. Ili na temelju višegodišnja ostvarenja njihove proizvodnje, ako su već izgrađene. Dobiva se vjerojatnosna ovisnost, koja kaže kolika je vjerojatnost pojave neke godišnje proizvodnje – između najveće od svih proizvodnji (za koju je vjerojatnost vrlo mala) i najmanje od svih mogućih proizvodnji (za koju je vjerojatnost gotovo 100 posto; dakle posve je sigurno da će proizvodnja biti barem tolika). Prilikom planiranja buduće godišnje proizvodnje uzima se onda nekoliko scenarija, recimo – u primjeru hidroelektrana – u vlažnoj godini, u sušnoj godini ili u prosječnoj godini. Često se, kao jedna reprezentativna moguća proizvodnja uzima ona koja bi se ostvarila uz 70-postotnu vjerojatnost.

## Priprema prirodnih oblika energije za pretvorbu u električnu energiju

Neki prirodni oblici energije, u izvornom svome obliku, onakvom kakvim su izuzeti iz prirode, pridobivenim iz prirode, mogu se bez prethodne pripreme koristiti za proizvodnju električne energije. To su: Sunčevo zračenje ako se koristi fotoćelijama za pretvorbu u električnu energiju ili ako se koristi za zagrijavanje vode i njezinu pretvorbu u vodenu paru radi privođenja parnoj turbini, vodne snage ako se privode vodnim turbinama, vjetar ako se prepusti djelovanju na vjetroturbine, te unutarnja toplinska geotermalna energija ako se unutarnja toplina Zemlje koristi za pogon parnih turbina u elektranama. Ostali prirodni oblici energije: ugljen, sirova nafta, nuklearno gorivo, te biomasa, bioplin i otpad moraju se najprije pripremiti, a neki čak i preobraziti, kako bi postali pogodnim gorivom za elektrane. Prirodni plin iz bušotine najčešće se također destilira prije korištenja.

Nakon pridobivanja u rudnicima, ugljen se mora transportirati brodskim, željezničkim ili cestovnim prijevozom do mjesta njegova korištenja. Za korištenje u Europi značajan je brodski transport prekooceanskim brodovima, ali i brodski transport europskim riječnim putovima. U suvremeno loženim termoelektranama, ugljen se prije dovođenja u ložište parnoga kotla, melje u prašinu, posebnim mlinovima. Takvo mljevenje omogućuje kontinuirani, brzi proces izgaranja na ložištu, dakle spajanja ugljika i vodika iz ugljena s kisikom iz zraka, kojeg također treba intenzivno dovoditi u ložište. Uskladištava se na otvorenom ili u zatvorenom (ekološki razlozi) odlagalištu uspostavljenom uz elektranu.

Sirova nafta ne koristi se u svome prirodnom obliku, već se prethodno pretvara u derivate nafte koji proces se odvija u rafinerijama nafte. Derivati nafte su razni plinovi te razni tekući derivati. Laki derivati dovode se u gorionike plinskih turbina u modernim plinsko-turbinskim elektranama, a teški derivati (mazut) u ložišta parnih kotlova u parnim termoelektranama. Dakako, opet za transport sirove nafte ili derivata služi brodski željeznički i cestovni prijevoz te naftovodi. Naftovodi danas imaju kontinentalne razmjere, pa čak i međukontinentalne, primjerice: između azijskog dijela Rusije i središnje Europe. Derivati, uskladištavaju se u rezervoarima postavljenim uz elektranu.

Laki derivati nafte koriste se za pogon plinsko-turbinskih elektrana, a teški derivati za pogon parnih termoelektrana. Prije svjetske naftne krize udio termoelektrana loženih naftom u svim termoelektranama bio je relativno visok, što je bila posljedica bezbrižne i rastrošne potrošnje nafte u svijetu. Nakon početka '70. godina prošlog stoljeća, taj udio rapidno pada jer se barem na tom sektoru korištenja naftom nastojala obaviti njezina supstitucija drugim gorivima kako bi se smanjila ukupna potrošnja nafte u svijetu. Plinsko-turbinske elektrane mogu se izvesti za korištenje alternativnim gorivom: lakim derivatima nafte ili prirodnim plinom. Ako imaju takvu mogućnost, nastoji se što više koristiti prirodni plin, a što manje nafta. Inače, u parnim termoelektranama loženim teškim naftnim derivatom izostaje mlin za pripremu goriva i ložište (koji postoje u termoelektrani loženom ugljenom), a izgaranje tekućeg goriva odvija se u komori izgaranja u koju se uvodi, dakako i zrak potreban za spaljivanje goriva.

Premda se prirodni plin može koristiti i izravno kao gorivo, ipak se najčešće u degazolinažama izdvajaju neke frakcije, a preostali plin koristi kao gorivo za izgaranje u ložištima plinsko-turbinskih ili parnih termoelektrana te za izravno pogonsko ili toplinsko korištenje u industriji, prometu i kućanstvima. Plin ne treba skladište uz elektranu, ali se skladišti na državnoj razini kako bi se omogućilo njegovo korištenje i pri vršnim opterećenjima plinskog sustava.

Korištenje prirodnim plinom, kao gorivom za elektrane, primjenjuje se u parnim termoelektranama, termoelektranama-toplanama, plinsko-parnim elektranama i plinsko-turbinskim elektranama. Karakteristično je to da vrlo brzo raste udio prirodnog plina, kao goriva za elektrane, naglašeno u zapadno-europskim zemljama, nadomještajući dotadašnje korištenje tekućim ili krutim gorivima (nafte ili ugljena). To je ekološki privlačno rješenje, jer se ostvaruje manja emisija ugljikova dioksida u atmosferu, a ostalih štetnih plinova izgaranja praktički nema, kao niti šljake. Međutim, orijentacija na prirodni plin je energetski zapravo neprihvatljivija, jer se njegovim izgaranjem u elektrani izgubi 50 do 60 posto toplinske energije, a samo 40 do 50 posto iskoristi u električnom obliku. Prirodni plin razumnije je koristiti za neposredno izgaranje u ložištima industrije, kućanstava i općih potrošača, u toplinske svrhe, jer se na taj način on energetski znatno više iskorištava nego li u termoelektranama.

Biomasu i otpad također moramo, često i mukotrpno, prikupiti, sortirati – izdvojiti energetski korisne od energetskih nekorisnih, ili čak štetnih sastojaka, a iz otpadaka izdvojiti one sastojke koji su korisni kao sekundarna sirovina, transportirati na mjesta prikupljanja, a s tih mjesta transportirati do termoelektrane. Dakako, slijed postupaka može se i izmijeniti tako da se biomasa i otpad najprije dovoze u elektranu te da se ondje obavi sortiranje i, svakako, sječenje ili mljevenje, kako bi ta masa bila pogodna za dopremu na ložište. Sekundarne sirovine izdvojene iz otpada značit će zapravo uštedu energije, pa i električne energije, koju bi trebalo uložiti za proizvodnju tih iz primarnih sirovina, dakle iz rudače.

Bioplin moramo najprije proizvesti iz izvorno prikupljenih pogodnih tvari (najpovoljniji su životinjski stajski ekskrement (izmet), ali i organski komunalni i kućni otpad, takav otpad iz povrtlarske, voćarske i ratarske proizvodnje, te iz odgovarajuće industrije). Bioplin nastaje anaerobnom fermentacijom tih tvari, dakle bez prisutnosti zraka ali uz dovođenje vode. Većim dijelom sastoji se iz metana i najčešće se koristi kao izvor topline (čak i za rasvjetu, u najnerazvijenijim dijelovima svijeta). Međutim, moguće je njegovo korištenje za pogon motora s unutrašnjim izgaranjem, time i za pogon električnih generatora.

Prirodni uran koji se pridobiva u rudnicima urana, može poslužiti nakon prerade kao nuklearno gorivo za elektrane koje su predviđene za korištenje uranom, uz prirodni sadržaj aktivnog izotopa U-235. Češće je korištenje tzv. obogaćenog urana kao goriva u nuklearnim elektranama, koje se obavlja u postrojenjima za obogaćivanje urana u kojima se prirodni sadržaj aktivnog izotopa urana U-235 od 0,7 posto povećava na 1,5 do 6 posto. Dobiva se prašina koja se sintetizira u gorivne tablete. Te tablete uranovog dioksida ulažu se u cjevčice od cirkonija i nepropusno zatvaraju. Cirkonij propušta neutronski tok i podnosi visoku temperaturu, čime omogućuje lančanu reakciju u reaktoru. Cjevčice se slažu u gorivne štapove duljine oko 4 m i promjera oko 1 cm i niz takvih štapova složen u dugu kvadratnu prizmu tvori gorivni element za nuklearni reaktor.

Energetski sadržaj nekih oblika energije, koji se koriste kao gorivo u elektranama, je:

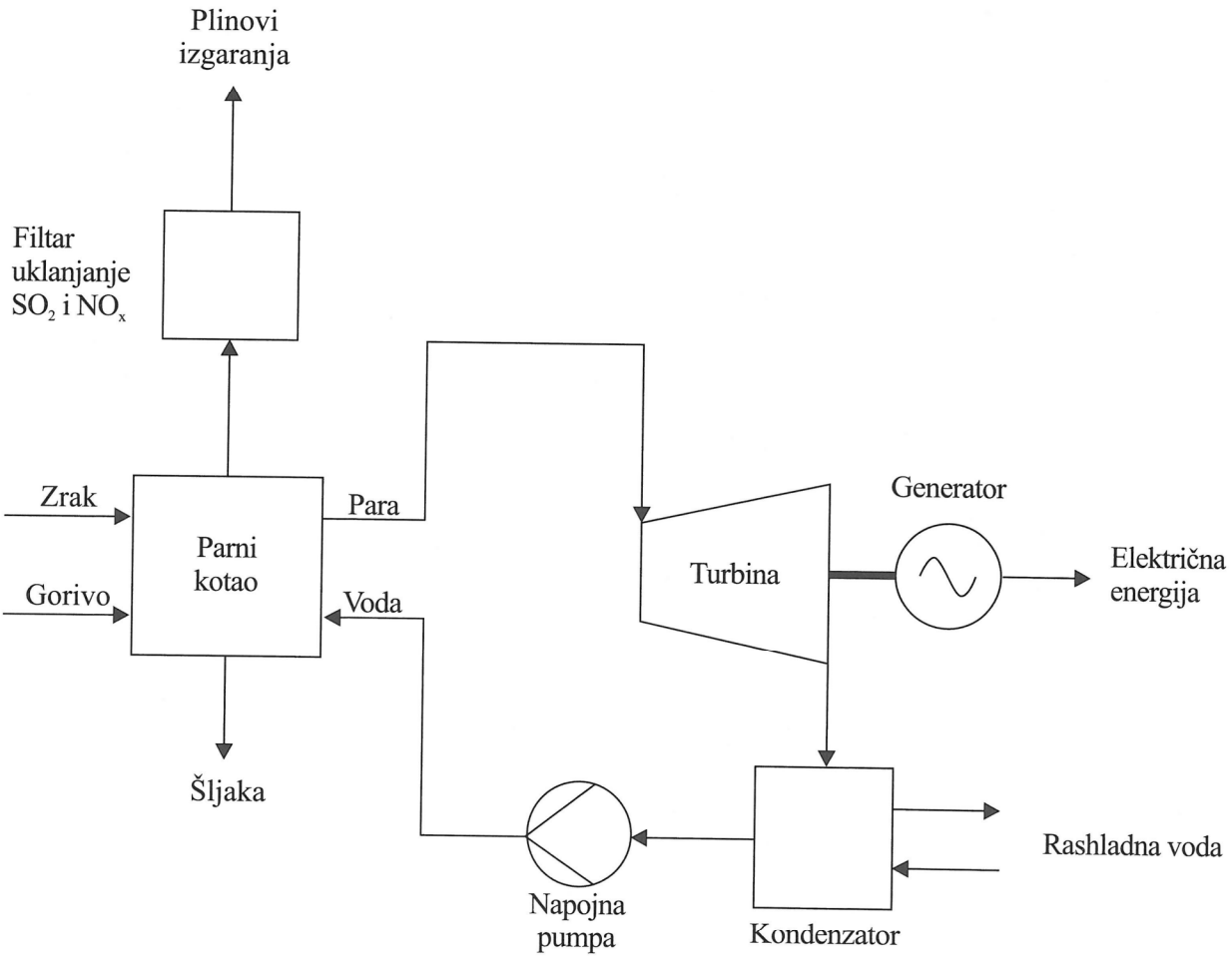
| | |
|---|---|
| – 1 kg motorskog benzina | 43,5 MJ |
| – 1 kg lakog loživog ulja | 42,7 MJ |
| – 1 kg dizelskog goriva | 42,7 MJ |
| – 1 kg teškog loživog ulja | 40,6 MJ |
| – 1 $m^3$ prirodnog plina | oko 34 MJ |
| – 1 kg kamenog ugljena | do 30 MJ |
| – 1 kg mrkog ugljena | do 20 MJ |
| – 1 $m^3$ bioplina | 20-25 MJ |
| – 1 kg ogrjevnog drveta | 10-16 MJ |
| – 1 kg lignita | oko 10 MJ |
| – 1 kg kućnog otpada | oko 10 MJ |
| – 1 kg drvne kore | 6-8 MJ |
| – 1 mg nuklearnog goriva | 3,75 MJ (NE Krško). |

Dodajmo: 1 kubni decimetar ogrjevnog drveta ima masu od približno 0,7 kg, a jedna litra sirove nafte ima masu od približno 0,86 kg.

Utvrdimo i zanimljivost, vezanu uz korištenje nuklearnog goriva u NE Krško. Tu jedan miligram nuklearnog goriva sadrži energiju od okruglo 1 kWh (1 kWh = 3,6 MJ) a ta masa goriva – prerađena u toj nuklearnoj elektrani – daje oko 1/3 kilovatsata električne energije na izlazu iz elektrane.

# Parne termoelektrane

Energetski proces koji se zbiva u parnoj termoelektrani od velikog je značenja, jer je udio proizvodnje električne energije u parnim termoelektranama u današnjem svijetu još uvijek najveći. S druge strane, taj proces zanimljiv je i stoga što on sadrži najviše stupnjeva pretvorbe jednog oblika energije u drugi, do konačne pretvorbe u električnu energiju (slika 6.1). Procesi u drugim tipovima elektrana sadrže nešto manje stupnjeva pretvorbe, sve do procesa izravne pretvorbe u električnu energiju, gorivnim ćelijama (doduše iz vodika, kojeg nema u prirodi), fotoćelijama i MHD-generatorima. Stoga je priča o energetskom procesu u parnoj termoelektrani najbolja za uvod u priču i o drugim tipovima elektrana, jer će pri opisu tih tipova izostajati pojedini stupnjevi pretvorbe koji postoje u parnoj termoelektrani.




*Slika 6.2. Parna termoelektrana*

Pripremljena fosilna goriva (ugljen, derivati nafte i prirodni plin) te nekomercijalna goriva (biomasa i otpad) dovode se na ložišta parnih kotlova u parnim termoelektranama, gdje se izgaranjem kemijska energija goriva preobražava u unutarnju toplinsku energiju vodene pare (slika 6.2). Kako bi se osiguralo izgaranje, treba na ložišta dovoditi i zrak u velikim količinama (ventilatori), a parnom kotlu treba osigurati neprekidno dovođenje vode radi

*Slika 6.3. Parna termoelektrana na ugljen (TE Plomin 2, u pogonu od 2000. godine)*

njezine pretvorbe u vodenu paru (napojna crpka). Plinovi izgaranja napuštaju parni kotao i odvođeni su dimnjakom termoelektrane u okolinu (slika 6.3). Kruti ostaci izgaranja, šljaka, također se odlažu u okolinu.

Vodena para, nakon njezine proizvodnje u parnom kotlu, sadrži unutarnju toplinsku energiju, to veću što su parametri te pare viši. U današnjim modernim termoelektranama ti parametri prelaze temperaturu od 500° C (danas do oko 580° C) uz pretlak veći od 200 bar (danas do oko 270 bar). Ograničenje daljnjem povećavanju tih parametara čini materijal za konstrukciju parne turbine koji mora bez plastičnih deformacija izdržavati tako visoke temperature i pretlake uz primjeren rok trajanja.

Unutarnja toplinska energija vodene pare pretvara se u kinetičku energiju u parnoj turbini u kojoj se ta kinetička energija pretvara u mehaničku energiju, vrtnjom rotora turbine. Na izlazu iz turbine iskorištena vodena para završava u kondenzatoru, gdje oduzimanjem topline kondenzira u vodu i napojnom crpkom odvodi ponovno na ulaz parnoga kotla. Time

je zaokružen vodno-parni kružni tok u parnoj termoelektrani. Dodajmo i to kako voda koja se koristi za proizvodnju vodene pare mora biti prethodno kemijski pripremljena u posebnom postrojenju elektrane za kemijsku pripremu vode.

Za hlađenje kondenzatora koristi se rashladna voda u drugom vodnom krugu parne termoelektrane, koja se izuzima iz obližnje rijeke, jezera ili mora, te – nakon zagrijavanja u kondenzatoru – ponovno ispušta u isti izvor rashladne vode (protočno hlađenje), ako to rashladne mogućnosti tog izvora dopuštaju. Ako nije tako, onda se zagrijana voda iz kondenzatora odvodi u rashladne tornjeve u kojima struji okolni zrak preuzimajući toplinu rashladne vode i odnoseći je u atmosferu. Rashladna voda ponovno se crpkom rashladne vode, dovoljno ohlađena, vodi u kondenzator, bez ispuštanja u okolinu. To je tzv. povratno hlađenje termoelektrane (voda za hlađenje neprestano se *vraća* kako bi iznova hladila, dakako dio te vode izgubi se isparavanjem). Rashladni tornjevi imaju karakterističan oblik hiperboloida i znaju biti ogromnih dimenzija. Iz njih struji neopasna vodena para stvarajući kod javnosti dojam o naglašeno opasnom zagađenju okoliša; javnost to ispuštanje pare doživljava kao ispuštanje dima (slika 14.2).

Mehanička energija rotora turbine (slika 19.2) predaje se osovinom rotoru električnog generatora i tu se obavlja posljednja pretvorba: mehaničke u električnu energiju. U električnom generatoru se vrtnjom elektromagneta na rotoru ostvaruje promjena magnetskog toka obuhvaćena zavojima statorskih namota, pa se u tim namotima tako inducira električni napon, prema Faradayevu zakonu elektromagnetske indukcije. Ako su na generator priključena trošila, tim namotima generatora teče struja koja s magnetskim poljem rotora tvori mehaničku protusilu i moment te sile mora biti uravnotežen s momentom koji proizvodi turbina. Što je veće opterećenje generatora, veća je i struja u njegovim namotima, pa je potrebno da i taj moment bude veći, što se postiže povećanjem dotoka pare u turbinu.

Ključni energetski podatak svake elektrane je ukupni stupanj djelovanja elektrane, iskazan omjerom proizvedene električne energije i energije nositelja energije na ulazu u elektranu.

Vrlo je važno: stupanj djelovanja turbine termoelektrane *bitno* ovisi o opterećenju turbine (vidjeti sliku 10.1). Ako se turbina vrti u praznom hodu, bez opterećenja na svojoj osovini, stupanj djelovanja je, dakako, nula. Jer pri vrtnji turbine u praznom hodu savladavaju se gubici praznoga hoda (gubici trenja u ležajevima i ventiliranja rashladnog sredstva u čitavu agregatu – turbini i generatoru), dakle ulaže se ulazna energija pri ništa korisne energije na izlazu, te je stupanj djelovanja nula. Pri porastu opterećenja turbine, postupno raste stupanj djelovanja, da bi pri opterećenju između 75 i 85 posto nazivnog dosegnuo svoj maksimum. To je stoga što se predviđa da turbina radi najčešće pod tolikim opterećenjem. Kod povećanja opterećenja iznad tog raspona do nazivne snage turbine, opet neznatno opada stupanj djelovanja. Dakle, pri ekonomičnom korištenju termoelektranom vrlo je važno da je opterećenje elektrane u području optimalnog stupnja djelovanja jer se u suprotnom troši više jedinica ulazne energije za proizvodnju jednog kilovatsata isporučena iz elektrane. Često se termoelektrane rangiraju prema tom specifičnom utrošku topline po jedinici proizvedene električne energije – dakako i taj se mijenja s opterećenjem elektrane. Govorimo li o maksimalnom stupnju djelovanja neke elektrane, odnosno o najmanjem specifičnom potrošku, bez posebne opaske, razumijevamo te podatke pri optimalnom režimu rada turbina u elektrani.

Kod parne termoelektrane su nositelji ulazne kemijske energije, dakako, goriva koja se uvode u elektranu. Oko 1950. godine je stupanj djelovanja parne termoelektrane bio samo oko 20 posto, a danas najmodernije dosežu nešto preko 40 posto.

Ilustrativni su njemački podaci o prosječno ostvarivanim stupnjevima djelovanja termoelektrana na fosilna goriva od 1950. godine do danas, tablica 6.1.

*Tablica 6.1. Prosječni stupanj djelovanja termoelektrana na fosilna goriva u Njemačkoj (%)*

| Godina | Zapadna Njemačka | Istočna Njemačka | Ukupna Njemačka |
|---|---|---|---|
| 1950. | 20 | | |
| 1960. | 28 | | |
| 1970. | 33 | | |
| 1980. | 35 | | |
| 1990. | 35 | 30 | 34 |
| 2000. | | | 36 |

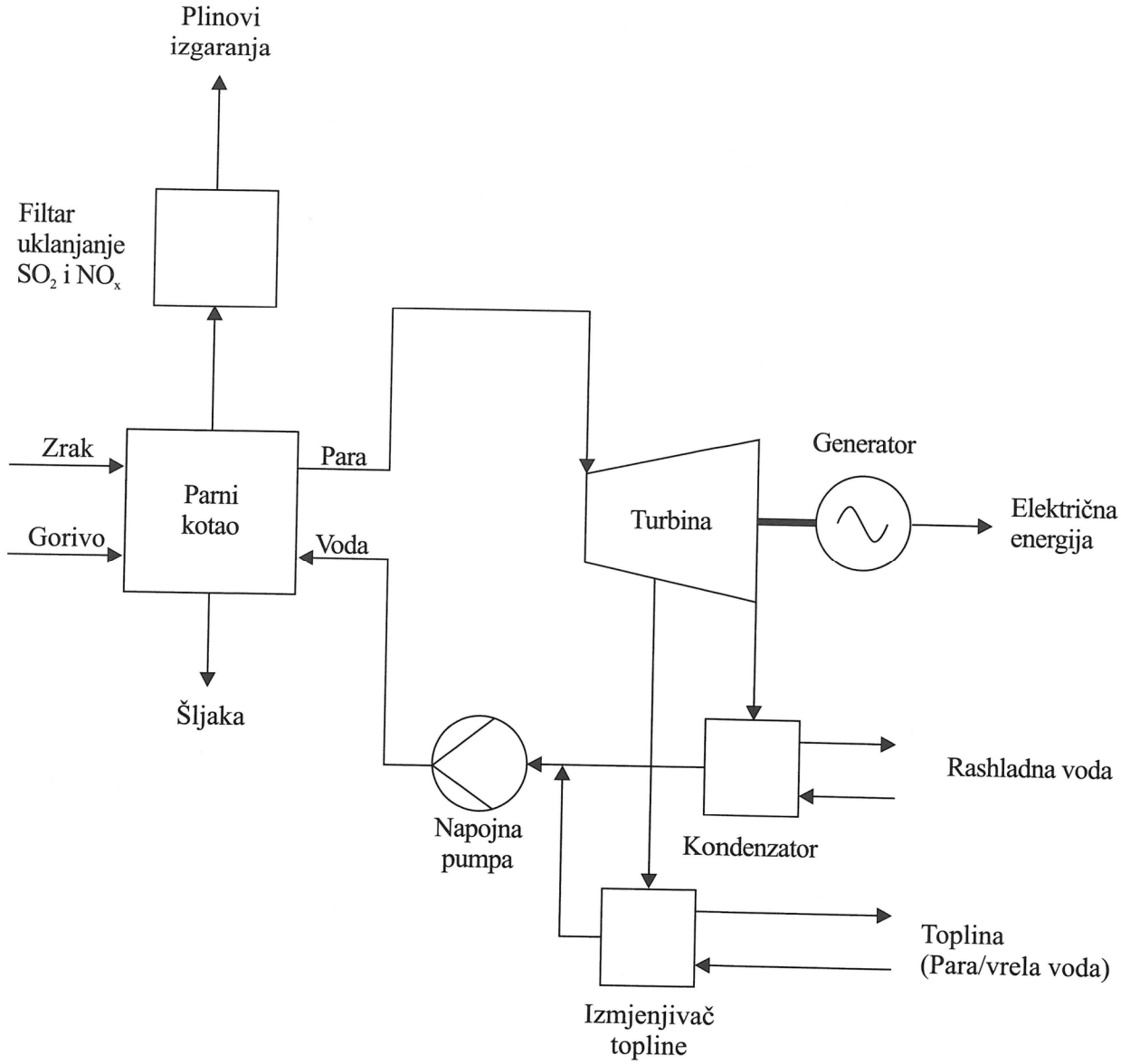
*Izvor: www.strom.de/14.10.2002*

Dakle, praktički, ranije 4/5, a danas nešto manje od 2/3 ulazne energije pretvori se u nekoristan oblik, kao neizbježan gubitak pretvorba oblika energije, te za vlastitu potrošnju brojnih pomoćnih uređaja bez kojih elektrana ne bi mogla funkcionirati. Ti se gubici u konačnici predaju kao toplina okolini i time konvencionalna termoelektrana zapravo većim dijelom ulazne energije goriva grije okolinu, a manji dio preobrazi u električnu energiju. No, to je fizikalno neizbježno – ta se pretvorba oblika energije ne može ni teorijski obaviti bez velikih gubitaka.

## Termoelektrane-toplane

Bolje iskorištenje goriva ostvaruje se termoelektranom u spojenom procesu (govorimo i o termoelektranama-toplanama) u kojoj se istodobno proizvodi električna energija i korisna toplinska energija. Spojeni proces proizvodnje električne i toplinske energije zove se *kogeneracija* (time se termoelektrane-toplane zovu ponekad *kogeneracijske elektrane*). Dakle, dio se otpadne topline ne ispušta u atmosferu, nego vodi toplinskim potrošačima-kupcima (slika 6.4). Dakako, nužno je da u blizini takve termoelektrane-toplane postoji dovoljna potražnja toplinske energije, jer se toplinska energija ne može prenositi na veću udaljenost zbog velikih gubitaka topline pri tom prijenosu. Često su velike termoelektrane izgrađene na mjestima pridobivanja goriva ili na mjestima s povoljnim mogućnostima dobave rashladne vode, koja najčešće nisu uz velike gradske aglomeracije, pa se one ne mogu izvesti kao termoelektrane-toplane. Inače, ukupno iskorištenje elektrane za spojenu proizvodnju električne energije i topline dostiže red veličine od oko 85 posto. Dakako, takvo iskorištenje postiže se samo u slučaju da je ritam proizvodnje električne energije podložan ritmu potražnje toplinske energije.

Turbine za rad u spojenom procesu nazivaju se turbine s oduzimanjem pare (protutlačne turbine), a turbine za rad bez oduzimanja pare nazivaju se kondenzacijske turbine (iskorištena para odvodi se u kondenzator). Tlak i temperatura vodene pare opada duž turbine, od ulaza prema izlazu pare iz turbine, pa treba izabrati mjesto za oduzimanje pare s povoljnim

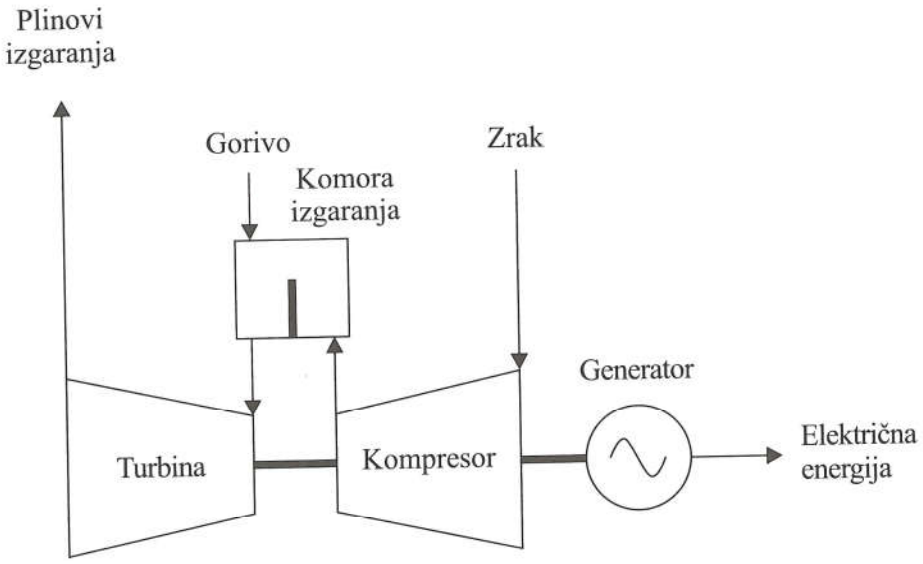



*Slika 6.4. Kondenzacijsko-oduzimna termoelektrana-toplana*

parametrima te pare za njezin transport i toplinsku potrošnju. Moguće su i izvedbe koje omogućuju kondenzacijski pogon i spojeni pogon, čime osiguravaju proizvodnju električne energije neovisnu o potražnji toplinske energije.

## Plinsko-turbinska termoelektrana

U plinsko-turbinskim elektranama (često se čuje i nepotrebno skraćeni naziv: plinska termoelektrana) koristi se za proizvodnju mehaničke energije plinska turbina. Kao gorivo služi plin ili lako tekuće gorivo, a naziv plinska turbina ne slijedi iz razloga što je ona pogonjena plinom, već iz razloga što se i tekuće gorivo u komori izgaranja rasplinjuje, zatim spaja sa stlačenim zrakom i spaljuje, te vreli plinovi izgaranja vode u plinsku turbinu i nakon izlaza iz turbine odvode dimnjakom u okolinu. Slike 6.5. i 6.6. U taj odvod može se staviti



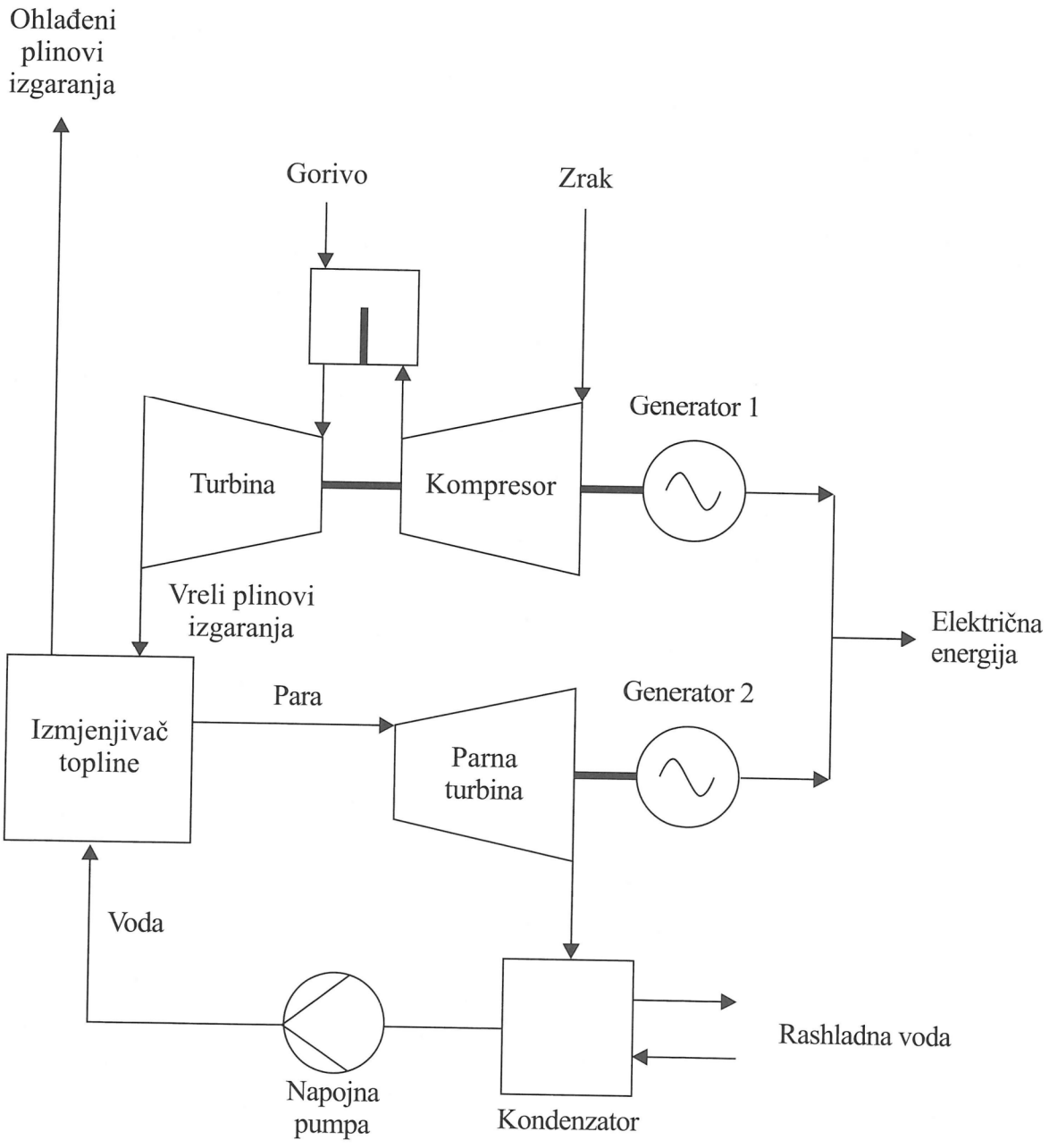

*Slika 6.5. Plinsko-turbinska elektrana*

izmjenjivač topline (*economiser*) koji dio topline plinova izgaranja preuzme i ta se toplina koristi za toplinsku potrošnju, uvećavajući stupanj iskorištenja goriva. Stupanj djelovanja najmodernije plinsko-turbinske elektrane danas je oko ili nešto preko 40 posto.

*Slika 6.6. Plinsko-turbinska elektrana (PTE Osijek, u pogonu od 1986. godine)*

# Plinsko-parne termoelektrane, kombi-termoelektrane

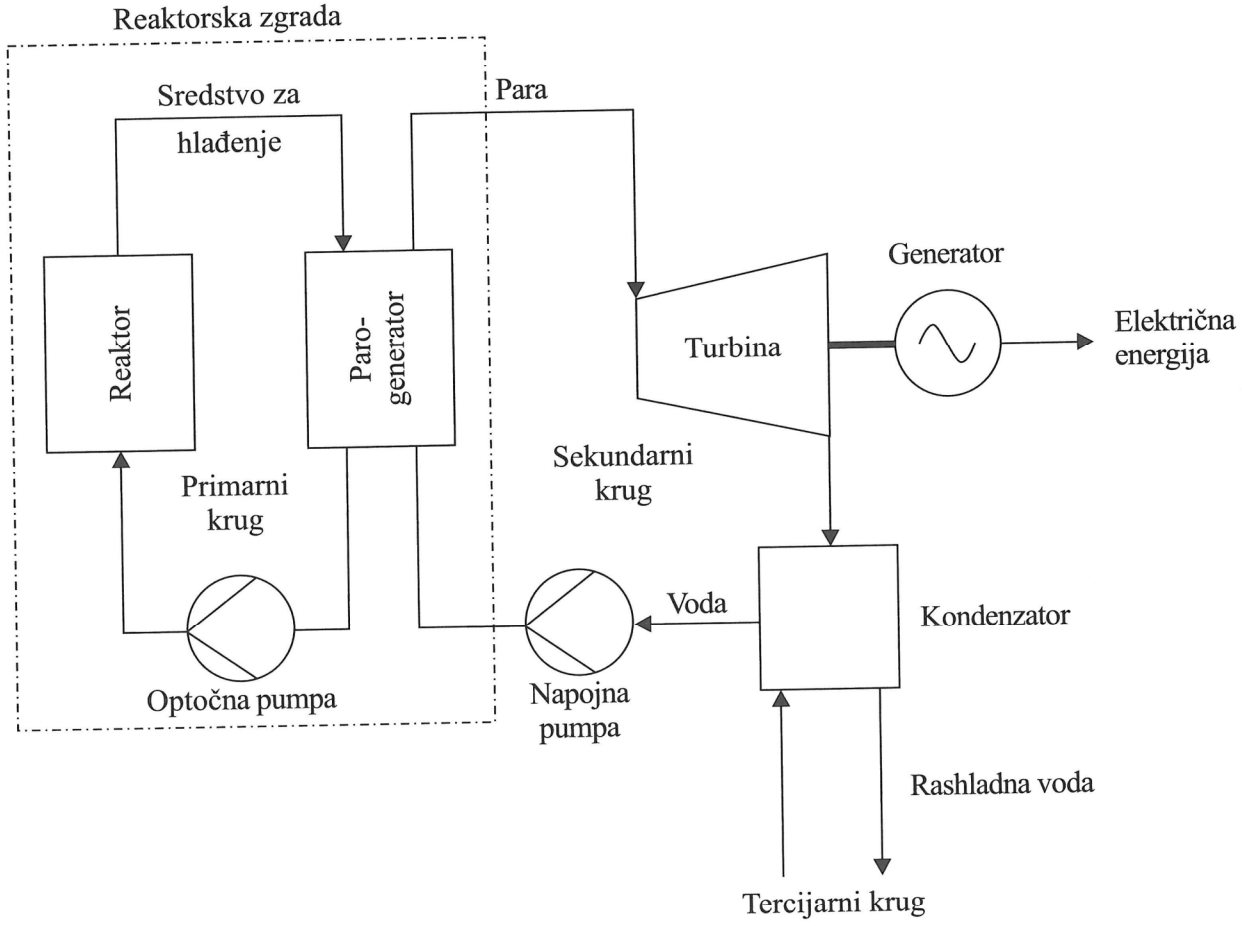
Poboljšanje ukupnog stupnja djelovanja termoelektrane postiže se primjenom kombinirane plinsko-parne termoelektrane, tzv. kombi-termoelektrane. U toj elektrani najprije gorivo izgara u plinskoj turbini, a relativno vrući plinovi izgaranja iz plinske turbine ne odvode se u atmosferu, nego u jedan izmjenjivač topline u kojem se na način poput onoga u parnom kotlu proizvodi vodena para koja se privodi parnoj turbini (slika 6.7). Time plinsko-parna elektrana ima zapravo dva energetska kruga, jedan plinski i jedan parni, dvije turbine, plinsku i parnu i dva razdvojena generatora koji proizvode električnu energiju. Postižu se stupnjevi djelovanja do oko 60 posto.




*Slika 6.7. Plinsko-parna termoelektrana*

# Nuklearne elektrane

U nuklearnim elektranama zbiva se proces preobrazbe nuklearne energije – u konačnici – u električni oblik energije. Na početku tog procesa stoji nuklearni reaktor koji nuklearnu energiju preoblikuje u unutarnju toplinsku energiju nositelja topline, koji kruži reaktorom i parogeneratorom, a u parogeneratoru se ulazna voda pretvara u vodenu paru koja se koristi za pogon parne turbine, jednako kao u parnoj termoelektrani (odnosno termoelektrani-toplani, ako se nuklearna elektrana koristi i za proizvodnju toplinske energije). Dakle, nuklearna elektrana razlikuje se od parne termoelektrane po tome što za proizvodnju pare ne služi parni kotao s ložištem goriva, nego nuklearni reaktor (slika 6.8) u kojem nuklearna reakcija izaziva razvitak topline a ta se toplina iznosi iz reaktora rashladnim sredstvom.




*Slika 6.8. Nuklearna elektrana PWR*

Ostvareni stupanj djelovanja toplinskog dijela nuklearnih elektrana kreće se od 33-35 posto, manje nego kod suvremenih parnih termoelektrana. To je zato što se ne primjenjuju granične temperature i tlakovi pare na ulazu u turbinu (kakvi se primjenjuju u modernim termoelektranama) radi što veće sigurnosti nuklearnih elektrana.

Glavne, bitne, komponente reaktora su:
– odgovarajuća masa nuklearnog gorivnog materijala,
– sredstvo za usporavanje neutrona na brzinu kojom prodiru u jezgru (moderator),
– uređaj za upravljanje i regulaciju toka neutrona (regulacijski štapovi),
– sredstvo za odvođenje topline i
– barijere za zaštitu od radioaktivnog zračenja.

Lančana radioaktivna reakcija nastaje tako da atom U-235 apsorbira neutron, koji izaziva raspad (cijepanje) jezgre atoma. Pri raspadu razvija se toplina i nova dva do tri neutrona, koji mogu izazvati nova cijepanja. Ali, neutronu se mora usporiti brzina kako bi izazvao novi raspad; to se postiže moderatorom. Regulacijskim štapovima apsorbiramo veću ili manju količinu emitiranih neutrona i time ostvarimo kontroliranu lančanu reakciju; tada je izjednačen broj emitiranih neutrona odgovarajuće brzine i broj novih raspada jezgara.

Prema rješenju glavnih komponenata, reaktori najčešće mogu biti, kako slijedi.

– *Lakovodni reaktori* (LWR) u kojima je obična voda ($H_2O$) iskorištena kao moderator i sredstvo za odvođenje topline. Kao gorivo služi izotop urana U-235 s obogaćenjem od 1,5-6 posto. Postoje dvije vrste lakovodnih reaktora: *reaktori s vodom pod tlakom* ili *tlakovodni reaktori* (engl. PWR, a ruska je kratica VVER) i *reaktori s ključalom vodom* (engl. BWR). Kod PWR-a voda za odvođenje topline (na temperaturi i pri tlaku pri kojima ne ključa) kruži u zatvorenom primarnom krugu u kojem se nalazi i generator pare, u kojem se proizvodi vodena para iz vode u sekundarnom krugu. U tom krugu nalazi se turbina i kondenzator u kojem para kondenzira uz odvođenje topline koje odvođenje se zbiva kruženjem rashladne vode u tercijarnom rashladnom krugu. U BWR-u voda za odvođenje topline iz reaktora pretvara se u vodenu paru već u samom reaktoru, napajajući izravno turbinu, čime je izbjegnut parogenerator i sekundarni rashladni krug.

– *Teškovodni reaktori* (HWR) ili *CANDU-reaktori*[56] u kojima je teška voda (deuterij, $D_2O$) iskorištena kao moderator i sredstvo za odvođenje topline. Kao gorivo služi izotop urana U-235, ali uz prirodni udio toga izotopa, oko 0,7 posto, te je jednostavnija i jeftinija njegova priprema. No, taj tip elektrane traži početno punjenje primarnog kruga teškom vodom; ona se dobiva iz prirodne vode, u kojoj je svaka 6 000. molekula molekula teške vode.

– RBMK *reaktori*; tip reaktora kakav se razvijao u bivšem Sovjetskom Savezu te se koristio u sovjetskim nuklearnim elektranama i u elektranama u zemljama bivšega istočnoeuropskoga bloka (nuklearna elektrana Černobil sadrži takve reaktore). U tom tipu reaktora, kao moderator služi grafit, voda kao sredstvo za odvođenje topline iz reaktora, a kao gorivo koristi se uran u prirodnom sadržaju izotopa U-235.

– *Oplodni reaktori* ili *breeder-reaktori*, koriste za pogon i izotope plutonija nastalih nuklearnom reakcijom visokoobogaćenog urana u reaktoru i omogućuje visoku iskorištivost goriva (do 70 puta veće iskorištenje nego pri korištenju u lakovodnom reaktoru). Nemaju moderatora, a kao sredstvo odvođenje topline služi tekući natrij.

– *Visokotemperaturni reaktori* (HTGR) koriste kao gorivo obogaćeni U-235 ili Th-232 koje je oblikovano u grafitne kuglice veličine teniske lopte. Tu grafit služi kao moderator, a kao rashladno sredstvo koristi se helij.

Najveći broj reaktora u nuklearnim elektranama na svijetu je tipa PWR (više od 60 posto) dakle s reaktorima s vodom pod tlakom, tlakovodni. Takav reaktor ima i Nuklearna elektrana Krško (NEK), pa ćemo ukratko opisati tu elektranu, slika 22.20.

---

[56] **CA**Nadian **D**euterium **U**ranium, taj reaktor razvijen je u Kanadi.

NEK sadrži jedan nuklearni reaktor toplinske snage oko 2 000 megavata, kao nuklearno gorivo koristi obogaćeni U-235. Ukupno je oko 50 tona goriva u reaktoru, u tome oko pet posto U-235. Razvijena toplina iz reaktora odvodi se vodom pod tlakom od oko 160 bar i temperaturom od oko 324 °C. Stalni optok vode za odvođenje topline reaktora osiguravaju dvije optočne crpke, snage od po pet megavata. Toplina se iz prvog, primarnog kruga predaje u parogeneratoru, na čijem izlazu je temperatura pare oko 280 °C i tlak oko 65 bara. Na reaktor u NEK priključena su dva paralelna primarna kruga, dakle dvije optočne crpke i dva jednaka parogeneratora, svaki polovice ukupne snage.

Drugi, sekundarni krug, zatvoreni je krug vodene pare i kondenzata (vode), odakle se voda, napojnim crpkama, snage 4,5 megavata, uvodi u parogeneratore.

Voda za hlađenje kondenzatora struji trećim, tercijarnim krugom u NEK. Taj je krug tek povezan s okolinom. U razdobljima kada je protok u rijeci Savi dovoljan, rashladnim crpkama uzima se voda iz rijeke i – nakon strujanja kondenzatorom – vraća natrag. Kada je u Savi nedovoljno vode, uključuje se i dodatni sustav za hlađenje kondenzatora, s rashladnim tornjevima. Kako bi se osigurala ravnomjernija opskrba rashladnom vodom, na Savi je izgrađena brana.

Reaktor, optočne crpke i parogeneratori, smješteni su u reaktorsku zgradu (*containment*). To je cilindrična čelična posuda, debljine stjenke 38 mm! Oko nje je betonska zatvorena posuda, na razmaku od oko 1,5 m. Debljina betonske stjenke je 76 cm, a prostor između čelične i betonske posude pod nižim je tlakom od okoline. Reaktorska zgrada nadvisuje okolinu za oko 60 m, a njezin vanjski promjer je 38 m. Reaktor je visok oko 12 m, a vanjski mu je promjer oko 6,7 m. Parogeneratori visoki su nešto više od 20 m, a promjer na širem dijelu im je oko 4,3 m. Parogeneratori su bili najveće komponente za pojedinačni transport, masa im je 345 tona.

*Slika 6.9. Ulaganje gorivnog elementa u reaktor NE Krško*

Gorivni elementi složeni su u kvadratične svežnjeve od po 16×16 štapova među kojima su i vodilice regulacijskih grafitnih štapova. Dugi su oko 3,5 m. Takvih elemenata u reaktoru NEK ima 121 komad. Gorivni elementi nalaze se u reaktoru tri godine (slika 6.9), a trećina goriva, koja se svake godine izdvaja, pohranjuje se u bazen s bornom vodom (bor upija neutrone, sprečava daljnju lančanu reakciju) gdje se hladi zbog topline naknadnih radioaktivnih procesa. Odatle, isluženo gorivo odvozit će se u postrojenje za njegovu preradu, a sada se pohranjuje u odlagalištu isluženog goriva u NEK.

Električna energija proizvodi se u generatoru, sadašnje snage 707 MW, a odvodi se s dva transformatora 21/400 kV, snage od 400 i 500 MVA, u elektroenergetski sustav na koji je Nuklearna elektrana Krško povezana pomoću dva dalekovoda 400 kV Krško–Maribor (jednostruki vod) i Krško–Tumbri (dvostruki vod).

## Hidroelektrane

U hidroelektranama se potencijalna energija vode posredno preobražava pomoću vodnih turbina i generatora u električnu energiju. Kako bi se omogućilo korištenje potencijalnom energijom vode, ona mora na ulazu u hidroelektranu biti na barem nešto višoj razini od razine vode na izlazu iz hidroelektrane, no, koristi se i voda čija gornja razina i više stotina, pa čak i preko tisuću metara nadvisuje razinu vode na izlazu. Snaga hidroelektrane izravno je proporcionalna toj razlici razina ulazne i izlazne vode:

$$P = 9{,}81 \cdot Q \cdot h \cdot \eta \qquad (6.2)$$

Tu su $P$ snaga hidroelektrane u kilovatima, $Q$ protok vode u $m^3/s$, $h$ visinska razlika gornje i donje razine vode u metrima i $\eta$ ukupni stupanj djelovanja hidroelektrane.

Hidroelektrane možemo podijeliti po različitim kriterijima, ali je najčešći prema izvedbi: protočne hidroelektrane, akumulacijske hidroelektrane i crpno-akumulacijske hidroelektrane. U hidroelektranama se ostvaruje vrlo visok stupanj djelovanja, i do 94 posto energije vode preobrazi se u električnu energiju, dakako pri optimalnom opterećenju (vidjeti sliku 10.1). Stupanj djelovanja varira i s variranjem pada vode, dakle s promjenom razine gornje vode mijenja se i stupanj djelovanja.

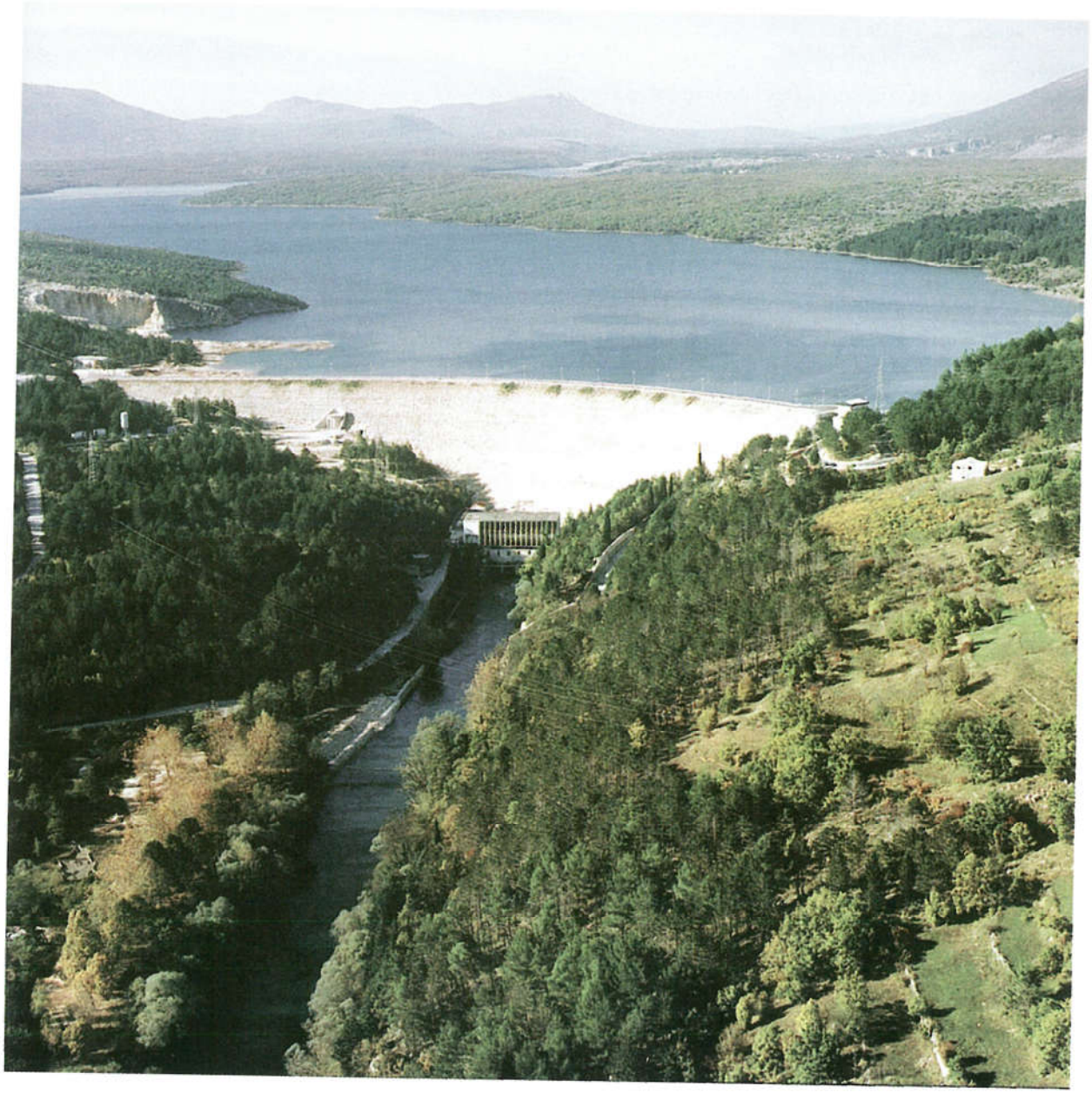
## Protočne hidroelektrane

Protočna hidroelektrana locira se na način da se zaustavi tok neke rijeke, što donekle podigne razinu gornje vode i time omogućuje funkcioniranje vodne turbine smještene u podnožje brane na rijeci ili u posebno izgrađen privodni kanal za hidroelektranu (slika 6.10). Karakteristično je za taj tip hidroelektrane da njezina trenutna proizvodnja (dakle njezina raspoloživa snaga) ovisi o prirodnom dotoku vode rijekom, uz neznatna prilagođenja te proizvodnje potražnji električne energije u elektroenergetskom sustavu u kojem radi ta hidroelektrana. Zbog potrebnog uređenja uzvodnog zaobalja rijeke, protočna hidroelektrana svojom izgradnjom može poboljšati prilike u riječnoj plovidbi, navodnjavanju poljoprivrednih površina, može poboljšati turističku ponudu kraja u kojem je izgrađena, te vodoopskrbu.

*Slika 6.10. Protočna hidroelektrana (HE Dubrava, u pogonu od 1989. godine)*

## Akumulacijske hidroelektrane

Akumulacijske hidroelektrane podižu se na mjestima na kojima postoji mogućnost akumuliranja vode u umjetno uspostavljenom jezeru tako da je razina vode u tom jezeru iznad razine neke moguće odvodnje te vode iz elektrane, dosta često je to razina mora, kamo ta voda i inače – prirodnim putem – u konačnici dospijeva. Za stvaranje umjetnog jezera podiže se brana, često vrlo velike visine i volumena ugrađenog materijala (slika 6.11). Hidroelektrana se smješta na razini donje vode a između nje i akumulacijskog jezera postavlja se tlačni cjevovod uz eventualni gravitacijski kanal za dovod vode elektrani ili je izvedena kao



*Slika 6.11. Akumulacijska hidroelektrana (HE Peruča, u pogonu od 1960. godine)*

pribranska elektrana, smještena uz najdonji dio brane. U akumulacijskom jezeru prikuplja se voda svojim prirodnim dotokom, te oborinska voda iz šireg područja jezera. Korištenje akumuliranom vodom nije povezano s punjenjem akumulacijskog bazena, naravno sve dotle dok bazen nije do vrha pun, nego je korištenje vezano uz dnevni, tjedni, sezonski, pa čak i višegodišnji ritam pažljivo planirane proizvodnje električne energije. Voda se koristi, bazen se prazni, u doba vršnih opterećenja elektroenergetskog sustava, a elektrana može mirovati u doba malih opterećenja omogućujući opet stanovito punjenje akumulacijskog bazena. Angažirana snaga može uvijek biti jednaka nazivnoj snazi (pri zatečenom padu vode), ali proizvodnja tom snagom je ograničena brzinom pražnjenja akumulacije. Kako pad vode, razlika između razina gornje i donje vode može iznositi i više stotina metara, a korisni volumen akumulacijskog jezera i više milijuna kubnih metara, to osobito snage a i moguće godišnje

proizvodnje akumulacijskih hidroelektrana mogu biti vrlo velike. Drugo dobro svojstvo tih elektrana već je spomenuto: velika regulacijska sposobnost takve elektrane – sposobnost da u vrlo kratkom vremenu prilagođava svoje opterećenje čak iznenada nastalim potrebama elektroenergetskog sustava.

## Crpno-akumulacijske hidroelektrane

Crpno-akumulacijska hidroelektrana (CAHE, naziva se još i: reverzibilna HE) zapravo je akumulacijska hidroelektrana koja ima mogućnost turbinskog i crpnog rada pogonskog stroja, te može vodu vraćati s donje razine na gornju, crpljenjem. Ona se koristi na kombinirani način: u razdobljima kada je potrebna njezina proizvodnja koristi se u turbinskom, generatorskom radu, a u razdobljima male potražnje električne energije u elektroenergetskom sustavu koristi se u crpnom, motorskom radu, te time posredno omogućuje akumulaciju električne energije, doduše ne izravno, nego u obliku potencijalne energije vode. Kako je na tržištu električne energije cijena energije u doba male potražnje niža, a u doba velike potražnje viša, to crpno-akumulacijska hidroelektrana ostvaruje – pored energetske – i novčanu dobit za elektroenergetski sustav u koji je ugrađena[57].

## Turbo-generatori konvencionalnih elektrana

U svim tipovima konvencionalnih elektrana, pa i u onim nekonvencionalnim u kojima se konačna pretvorba u električnu energiju zbiva iz rotacijske mehaničke energije, koristi se turbo-generatorski agregat za tu pretvorbu. Agregat, dakle, spoj turbine i generatora.

Generator je u pravilu sinkroni trofazni električni stroj, koji na izlazu daje napon: od niskog nazivnog izmjeničnog napona pa do napona od otprilike 25 kV. U Europi je nazivna frekvencija 50 Hz, a u Sjevernoj Americi, dijelu Japana, Saudijskoj Arabiji i u dosta južnoameričkih zemalja nazivna je frekvencija 60 Hz.

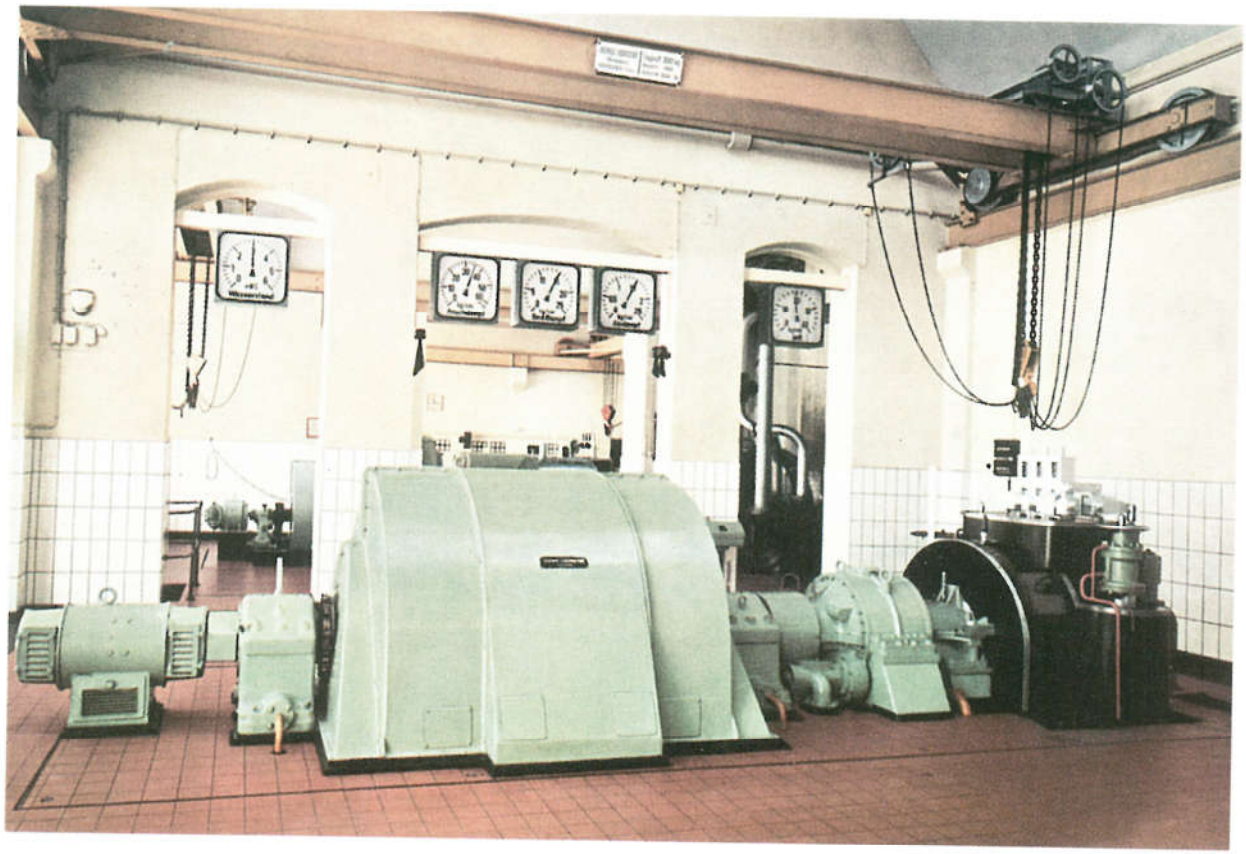
Sinkrona brzina vrtnje generatora mora biti usklađena s frekvencijom električne mreže i brojem pari polova rotorskog elektromagneta, prema relaciji:

$$n = 60 \cdot f / p \qquad (6.3)$$

gdje se brzina vrtnje $n$ dobiva u okretajima u minuti, ako se frekvencija $f$ iskaže hercima, uz broj pari polova $p$ ($p = 1$ za jedan par polova, dakle za ukupno dva pola: sjeverni i južni, odnosno $p = 2$ za dva para polova itd).

Turbogeneratori (tako se nazivaju generatori termoelektrana, slika 6.12, i nuklearnih elektrana) izvode se za velike brzine vrtnje jer tako odgovara primijenjenim turbinama. To su najčešće generatori s jednim ili dva para polova, dakle brzina vrtnje im je od 3 000 ili 1 500 okretaja u minuti, uz frekvenciju 50 Hz. To je vrlo velika brzina; dijeljenjem s 60 dobije se broj okretaja u sekundi, dakle 50 odnosno 25 okreta u svakoj sekundi! Veća brzina vrtnje određuje manji broj zavoja namota na statoru a manja brzina vrtnje, veći

[57] Elektroenergetski sustav Hrvatske sadrži CAHE Velebit (slika 22.21), nazivne snage – u turbinsko-generatorskom radu 276 MW, a u crpno-motorskom radu 240 MW, te male CAHE Fužine, snage 4 MW i CAHE Lepenica, snage 1,1 MW.

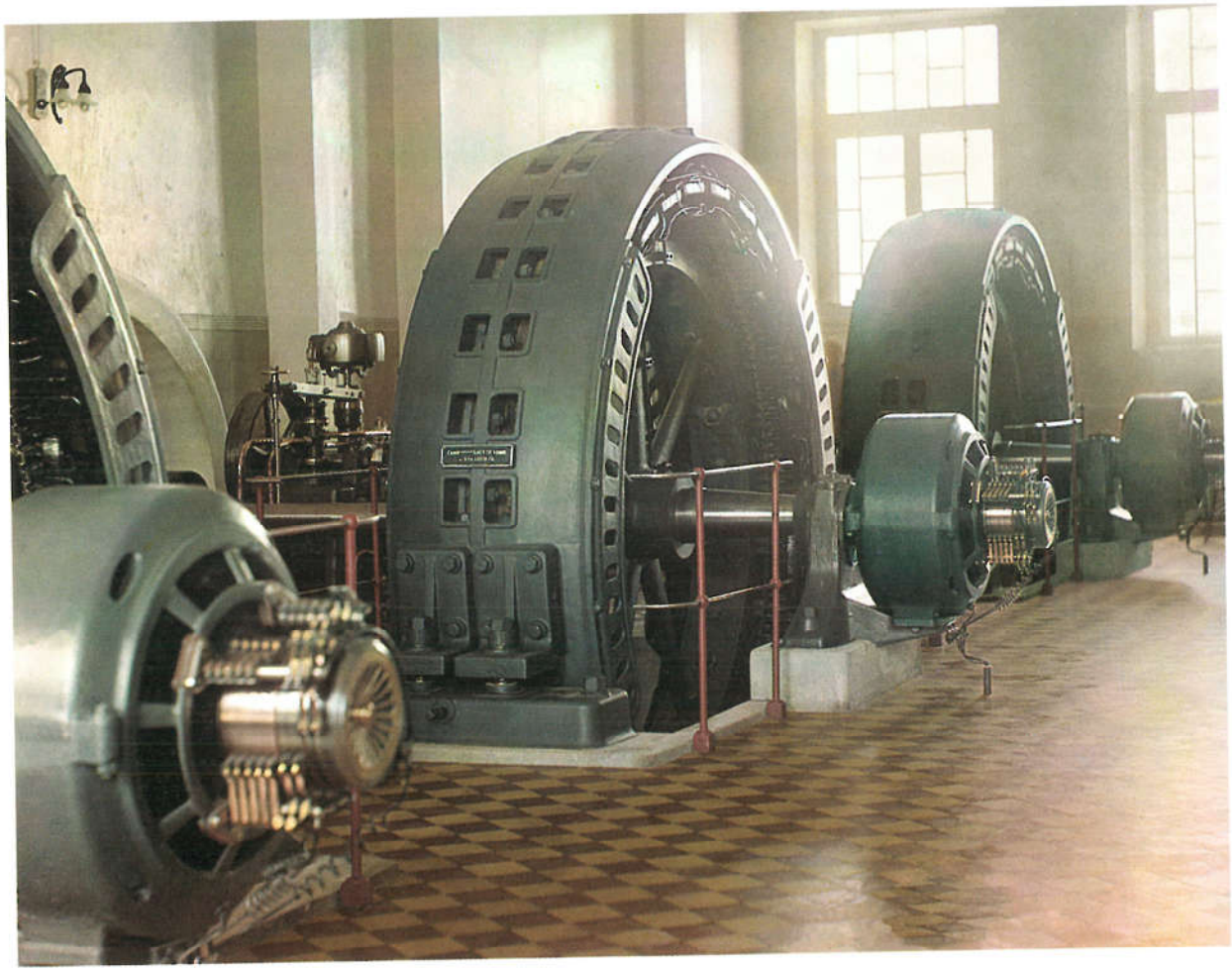


*Slika 6.12. Turbogenerator u termoelektrani*

broj zavoja. Veća brzina određuje jače centrifugalno naprezanje svih okretnih dijelova, pa se turbogeneratori izvode manjeg promjera (centrifugalna sila opada razmjerno promjeru) a veće aksijalne duljine i uobičajenija je primjena brzine vrtnje od 1 500 okretaja u minuti.

U svim tipovima hidroelektrana ugrađuju se vodne turbine: Kaplanova, Francisova ili Peltonova. Pri tome se Kaplanova turbina ugrađuje u protočne hidroelektrane s velikim protokom vode i manjim padom, Francisova u protočne i akumulacijske hidroelektrane s osrednjim padom vode i osrednjim protocima, a Peltonova turbina prvenstveno u akumulacijske hidroelektrane s vrlo velikim padom vode i manjim protocima. Potencijalna energija vode se najprije na ulazu u turbinu pretvara u kinetičku energiju strujanja vode koja djeluje na lopatice rotora turbine ostvarujući vrtnju rotora, i mehaničku energiju (rotori vodnih turbina prikazani su slikama 19.3 do 19.5). Ta mehanička energija osovinom se prenosi na rotor generatora čijom vrtnjom se preoblikuje u električnu energiju.

Hidrogeneratori (tako se nazivaju generatori u hidroelektranama, slika 6.13) izvode se uz manje brzine vrtnje jer tako odgovara njihovim turbinama. Stoga moraju imati više pari polova, smještenih po obodu rotora većeg promjera, što je ostvarivo jer centrifugalna sila opada s brzinom vrtnje (ovisi kvadratno razmjerno o brzini vrtnje), pa time i naprezanje okretnih dijelova pod djelovanjem te sile. Sinkrone brzine vrtnje hidrogeneratora kreću se od nekoliko desetaka pa do više stotina okretaja u minuti. Primjerice za stroj s dvanaest pari polova sinkrona je brzina vrtnje 250, a s dvadeset četiri para polova 133 okretaj u minuti.



*Slika 6.13. Hidrogeneratori u hidroelektrani*

## Elektrane na biomasu i otpad te na bioplin

Pri korištenju biomasom (ogrjevno drvo, gorivi materijal biljnog i životinjskog podrijetla) i otpadom (kućni, komunalni, poljoprivredni i industrijski), za loženje u elektranama ostvaruje se niži stupanj djelovanja nego kod parne termoelektrane na ugljen, naftu ili plin. Zato što priprema goriva nije tako temeljita, i time skupocjena, kao kod ugljena, što se ne radi o do kraja homogenom gorivu, pa se stoga izgaranje ne odvija u najboljim uvjetima. Često to gorivo sadrži i velik udio vlage, pa se dio energije izgaranja utroši nekorisno, na isparavanje te vlage. Parametri pare koja se koristi u takvim elektranama također su niži od maksimalnih parametara u termoelektranama na ugljen, naftu i plin, jer se u pravilu radi o manjim snagama i jeftinijim postrojenjima, kako bi njihovo korištenje sadržavalo po mogućnosti što manji investicijski trošak. Ekološki, te bi elektrane trebale biti – lokalno gledano – nešto štetnije od konvencionalnih termoelektrana, jer troše nešto više kemijske energije goriva za proizvedenu električnu energiju, pa time imaju i povećanu emisiju ugljikova dioksida. Međutim, ostalih štetnih sastojaka u plinovima izgaranja općenito nemaju, jer se štetne tvari pažljivo izdvajaju prilikom pripreme goriva, a emisija ugljikova dioksida pri izgaranju biomase jednaka je potrošnji ugljikova doksida pri fotosintezi biomase.

Osobito elektrane ili termoelektrane-toplane (odnosno, samo toplane) koje koriste smeće u tom su pogledu uzorne jer i inače promiču kulturu postupanja smećem na ekološki posve osviješten i suvremen način[58].Slika 6.14.

*Slika 6.14. Spalionica smeća u Njemačkoj*

U elektranama na bioplin, također i elektranama na deponijski i kanalski plin, nema vodno-parnog kruga, jer se tu plinovi dovode izravno motoru s unutrašnjim izgaranjem ili plinskoj turbini. Povezani s električnim generatorom proizvode električnu energiju, a najčešće se koriste u spojenom procesu pri čemu se otpadna toplina iz procesa ili hlađenja pogonskog motora koristi kao izvor topline. U tom slučaju ostvaruje se visok stupanj iskorištenja plina, oko 80 posto[59].

## Geotermalne elektrane

Električna energija može se proizvoditi u geotermalnim elektranama, ali samo na onim svjetskim područjima gdje postoje nalazišta prirodne tople vode pod temperaturom od otprilike 100 °C–150 °C. U Europi time je najbogatiji Island, koji oko 20 posto električne energije proizvodi u geotermalnim elektranama, slika 6.15. U Italiji koristi se geotermalna elektrana od 1904. godine koja danas ima snagu 400 MVA. Dubina bušenja radi dopiranja do podzemne vrele vode zna dosezati i 5 000 m.[60] U takvoj elektrani, u odnosu spram konvencionalne

[58] Samo u Njemačkoj, Švicarskoj i Austriji u pogonu je oko 100 takvih postrojenja, spalionica smeća (*Müllverbrennungsanlage*), u tome štzdesetak u Njemačkoj.

[59] Korištenje bioplinom za proizvodnju električne energije doživljava veliki skok u Njemačkoj; u 2005. godini proizvedeno je 3,2 TWh iz bioplina a 2006. godine čak 18,6 TWh (tom energijom mogla bi se opskrbiti cjelokupna brutopotrošnja Hrvatske!).

[60] Od studenog 2003. godine, nakon petmjesečne gradnje, prva geotermalna elektrana u Njemačkoj priključena je na mrežu. Instalirana je u Neustadt-Glewe. Izgrađena je uz tamošnju geotermalnu toplanu i opskrbljivat će okruglo 500 kućanstava ekološki proizvedenom električnom energijom, iz spojenog procesa. *Srce* postrojenja je jedna parna turbina snage oko 220 kilovata, u kojoj će se proizvesti godišnje oko 1 400 megavatsati električne energije. Dakle, godišnje trajanje instalirane snage biti će visokih gotovo 6 400 sati.
Početkom 2004. godine u Unterhachingu/Bavarska izveden je početni zahvat na najdubljoj geotermalnoj bušotini u Njemačkoj. Dva mjeseca trajalo je bušenje za pridobivanje tople vode iz preko 3 300 metara dubine radi proizvodnje električne energije i topline za daljinsko grijanje gradića Unterhaching s oko 20 tisuća stanovnika. Bit će instalirano preko 3 megavata električne snage i oko 16 megavata termičke snage. Ukupna investicijska vrijednost projekta je 36 milijuna eura.

*Slika 6.15. Geotermalna elektrana na Islandu*

termoelektrane, izostaje priprema goriva i ložište te izgaranje goriva, a prirodna vruća voda odvodi se u izmjenjivač topline u kojem se proizvodi vodena para potrebna za pogon turbogeneratora. Moguće je i izravno uvođenje vodene pare na izlazu bušotine iz tla, u turbinu. Nakon iskorištenja, kondenzat se načelno opet vraća u podzemlje.

## Sunčane elektrane

Sunčevo zračenje može se koristiti u elektroenergetske svrhe na dva načina: za proizvodnju topline putem sunčanih apsorbera ili za izravnu pretvorbu u električnu energiju pomoću fotonaponskih ćelija. U prvom slučaju se nizom postavljenih paraboličnih ili pokretnih zrcala koncentrira dozračena energija Sunca na jedan mali prostor, gdje se u generatoru pare proizvodi vodena para i energetski proces teče dalje kao i u parnoj termoelektrani. Pokretna zrcala moraju biti tako postavljena da prate prividnu Sunčevu putanju od istoka prema zapadu na nebu i uvijek koncentriraju pristiglo zračenje na isti nepomični maleni prostor, fokus parabole[61]. Sunčevo zračenje koristi se mnogo više, ali kao izvor za izravno korištenje toplinom pomoću kolektora smještenih na krovove kuća ili općenito zgrada. No, tu nije riječ o korištenju Suncem za proizvodnju električne energije.

[61] U sadašnje vrijeme (početkom 2005. godine), u svijetu je u komercijalnoj primjeni ukupno 354 megavata termoelektrana koje koriste Sunčevo zračenje za proizvodnju pare. Dva su načina *Concetrating Solar Power* (CSP)-tehologije. Prema jednom sustavu (tzv. *koritasti* ili *valovni* sustav), u žarišnoj osi uzdužnih paraboličnih zrcala postavljene su apsorpcione cijevi u kojima se generira para i vodi u parnu turbinu. Prema drugom sustavu (tzv. *toranjski* sustav), u žarište okruglog paraboličnog zrcala, na vrhu jednog tornja, postavljen je generator pare.

*Slika 6.16. Fotonaponsko postrojenje* 1 MW *u Njemačkoj*

Drugi je način korištenja Sunčevim zračenjem za proizvodnju električne energije primjena fotonaponskih ćelija (slika 6.16), fotoćelija. To su takvi poluvodički elementi u kojima se energija Sunčeva zračenja izravno pretvara u električnu energiju. Fotoćelije se proizvode iz silicija kojeg ima mnogo u Zemljinoj kori (najzastupljeniji nakon kisika, udjelom 28 posto), ali je proizvodnja fotoćelija vrlo skupa. Prema skupoći proizvodnje, fotoćelije mogu biti amorfne, polikristalne i monokristalne. U najjeftinijim amorfnim fotoćelijama, kristalizacija molekula silicija se odvila na prirodni način; rezultat je ćelija koja ima stupanj djelovanja maksimalno šest posto. Dakle, za dobivanje jednog kilovatsata iz te ćelije, treba dozračena Sunčeva energija imati vrijednost od oko 15 kilovatsati.

Nešto skuplje, polikristalne ćelije ostvaruju stupanj djelovanja 11 do 14 posto. Najskuplje, monokristalne ćelije ostvaruju i najviši stupanj djelovanja, između 12 i 16 posto. U sva tri slučaja, riječ je se o doista malenom stupnju djelovanja pri energetskoj pretvorbi koja se zbiva u fotoćelijama. Format uobičajene fotoćelije je 10 cm × 10 cm (slika 19.7), pa se takve elementarne ćelije spajaju serijski i paralelno, radi povećanja izlaznog istosmjernog napona i ukupne struje koja izlazi iz osunčanih ćelija i takva se kombinacija naziva solarnim modulom ili solarnim panelom. Izlazni istosmjerni napon iz takvoga modula je obično 15 do 20 volta.

Teško je govoriti o fotonaponskim sunčanim elektranama, dakle, postrojenjima za iole masovniju proizvodnju električne energiju, premda ima i takvih svjetskih primjera[62]. Češće se fotonaponski solarni moduli instaliraju u kućanstva ili neke javne ustanove gdje se obavlja proizvodnja električne energije *u malome*. Osobito je u korištenju njihova primjena za opskrbu manjim količinama električne energije objekata do kojih ne dopire javna električna mreža ili je na drugi način otežan priključak na tu mrežu. Primjeri su: parkirališni automati, telefonske govornice duž autoputova, skromna opskrba za rasvjetu i radio-prijem u udaljenim vikendicama ili planinarskim kućama, te za opskrbu električnom energijom svemirskih letjelica. Kako bi se osigurala opskrba električnom energijom i u dnevnim razdobljima kada nema osunčanosti, takve se fotoćelije kombiniraju u malene sustave koji sadrže akumulator i taj se puni za vrijeme osunčanosti, a prazni u razdoblju mraka. Kod primjene fotoćelija nešto većih izlaznih snaga, koristi se spoj na javnu električnu mrežu, ali u tom slučaju taj spoj

[62] Najveća, u današnjem svijetu, fotonaponska elektrana je u Portugalu kod grada Serpa, ima snagu od 11 MW, a investicijski troškovi bili su 61 miljun eura, dakle oko 5 500 eura/kW. Površina koju zauzimaju fotonaponske ćelije ima ploštinu od 60 hektara.

ne može se ostvariti izravno, nego putem pretvornika koji električnu energiju istosmjerne struje proizvedenu fotoćelijama pretvara u električnu energiju izmjenične struje, nužnu za spoj s javnom električnom mrežom.

Prirodno dozračena Sunčeva energija na četvorni metar ploštine, ovisna je o geografskoj širini područja o kojemu je riječ, znatno je viša na ekvatoru no na Zemljinim polovima. Na hrvatskoj geografskoj širini, godišnje dozračena energija Sunčeva zračenja je 1 200-1 400 kWh/m$^2$ u kontinentalnom dijelu i 1 400-1 600 kWh/m$^2$ u primorskom dijelu. Uz pretpostavljeni stupanj djelovanja fotoćelije od desetak posto, jedan četvorni metar sunčana panela dao bi oko 120-160 kWh električne energije godišnje. Međutim, kako korištenje električnom energijom nema isti dnevni ritam kao i Sunčevo zračenje, to je nužan spoj takva panela s javnom električnom mrežom, radi osiguranja poželjne opskrbe električnom energijom u onim razdobljima kada nema osunčanosti.

## Vjetroelektrane

U vjetroelektranama se kinetička energija zračnih masa pretvara udaranjem u lopatice elise vjetroturbine u mehaničku energiju, koja se osovinom privodi električnom generatoru radi konačne preobrazbe u električni oblik. Snaga takve vjetroturbine proporcionalna je brzini vjetra na treću potenciju. Dakle, ako je – primjerice – izlazna snaga vjetroturbine 100 kW pri brzini vjetra od 5 m/s, tada će snaga te iste vjetroturbine pri dvostruko većoj brzini (10 m/s) biti čak 800 kW. Snaga se vjetroelektrane, dakle, radikalno mijenja s promjenom brzine vjetra. Pri malim brzinama vjetra, vjetroelektrana mora obustaviti proizvodnju električne energije, jer bi proizvodnja bila nestabilna. Isto tako, pri brzini vjetra većoj od maksimalne, također se proizvodnja električne energije mora obustaviti, radi sigurnosti vjetroelektrane. Vrlo male vjetroelektrane mogu se koristiti u kombinaciji s akumulatorom za opskrbu električnom energijom objekata udaljenih od električne mreže. Međutim, vjetroelektrane iole većih snaga, te skupine vjetroelektrana grupirane u tzv. vjetroelektranski park (slika 6.17), ne mogu se koristiti na taj način jer je uskladištavanje većih količina električne energije u akumulatorima, nemoguće. Stoga se takve vjetroelektrane uključuju u elektroenergetski sustav, kamo plasiraju svoju proizvodnju sukladno dotoku vjetra. Kao što znamo, vjetar je teško predvidljiv, pa elektroenergetski sustav koji sadrži više vjetroelektrana mora imati konvencionalne regulacijske elektrane kojima se izjednačuje potražnja za električnom energijom s proizvodnjom, neovisno o tome ima li u tom trenutku vjetra ili ga čak nema, te koliki je on. Stoga, park konvencionalnih elektrana u sustavu mora biti dimenzioniran kao da vjetroelektrana gotovo uopće nema, ako se želi ostvariti zatečena sigurnost opskrbe električnom energijom, jer su apsolutno vjerojatna razdoblja kada vjetar na pojedinoj lokaciji ne puše[63].

[63] Nijemci, koji imaju najrazvijeniju primjenu vjetroelektrana u svijetu, naglašeno su izloženi svoj toj problematici – u pogledu potrebe sve većeg angažiranja regulacijskih elektrana i rezerve, nedovoljne izgrađenosti prijenosne mreže u široj okolini vjetroelektranskih parkova, do – zapravo – smanjenja sigurnosti opskrbe svojih kupaca-potrošača. Razvoj njemačkih vjetroelektrana doista je impresivan: krajem 2006. godine u svijetu je bilo instalirano oko 75 000 MW u vjetroelektranama, Nijemci sudjeluju s 20 622 MW ili 27 posto u svjetskoj instalaciji. U toj godini u vjetroelektranama Njemačke proizvedno je 30,5 TWh ili 5,6 posto brutopotrošnje električne energije. Razvoj instalirane snage krajem godine i godišnje proizvodnje u posljednjih desetak godina vjetroelektrana Njemačke bio je:

| Godina | 1993. | 1994. | 1995. | 1996. | 1997. | 1998. | 1999. | 2000. | 2001. | 2002. | 2003. | 2004. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Inst. snaga (MW) | 317 | 609 | 1090 | 1523 | 2035 | 2833 | 4380 | 6054 | 8675 | 11849 | 14494 | 16469 |
| Proizvodnja (GWh) | 675 | 1430 | 1710 | 2082 | 3035 | 4594 | 5524 | 9351 | 10455 | 15852 | 18864 | 25272 |

*Slika 6.17. Vjetroelektranski park Trtar-Krtolin kod Šibenika,* 14 × 0,8 MW

Vjetroagregati se postavljaju na tornjeve relativno velike visine, jer moraju omogućiti vrtnju elisa iznad tla, a radijus elisa zna biti pedesetak metara za srednje snage vjetroelektrana. Snaga vjetroelektrane raste s radijusom elise na kvadrat, međutim, elisa ne može biti preduga zbog ograničenja mehaničkom čvrstoćom materijala od kojeg je izrađena. Najčešće se koriste elise s tri lopatice (raspoređene poput *Mercedesova* znaka, slika 19.6) koje se vrte u vertikalnoj ravnini, a osovina turboagregata je horizontalna i cijeli je sustav okretan oko vertikalne osi kako bi se elisa postavila u najbolji smjer u odnosu spram smjera puhanja vjetra. Rjeđe se izvode elise s mnogo lopatica, s dvije lopatice, pa čak i s jednom lopaticom, a ima i izvedaba elisa koje zahvaćaju vjetar stvarajući svojom vrtnjom jedan cilindar s vertikalnom osi. Te posljednje elise ne trebaju prilagođavanje svoga smjera smjeru dotoka zračnih masa.

Vjetroelektrane ili vjetroelektranski parkovi postavljaju se na kopnu (*on-shore*), a u najnovije doba sve više i na priobalnom moru (*off-shore*), današnje veličine jedinice oko 5 MW, jer je brzina vjetra ondje veća i na manjim visinama. U najnovije doba, u zemljama u kojima je došlo do ranije masovnije primjene vjetroelektrana, sve naglašenija i zamjena agregata manje snage, agregatima veće snage (*repowering*), radi boljeg iskorištenja ranije zauzetih lokacija.

## Male hidroelektrane

Male hidroelektrane imaju sva svojstva velikih hidroelektrana, samo im je instalirana snaga – ovisno o zakonodavstvu u pojedinim zemljama, ali u pravilu do 10 MW. Te su elektrane najčešće u izvedbi protočnih hidroelektrana izgrađenih na potocima ili rječicama, u pravilu nestalnog dotoka vode – koji može u određenom razdoblju godine i presušiti. Izvode se što racionalnije kako bi investicijski trošak bio što manji i uglavnom rade bez ikakve posade, samo uz povremeni nadzor.

## Gorivne ćelije

Gorivne ćelije služe za izravnu pretvorbu kemijske energije vodika u električnu energiju, ali bez izgaranja goriva, dakle, elektrokemijskim putem. Rezultat tog elektrokemijskog procesa je električna energija, toplinska energija i otpadna voda. U prvi mah ekološki vrlo privlačno! Kao gorivo za gorivne ćelije koristi se vodik. Međutim, vodik se samostalno ne nalazi u prirodi, pa ga treba proizvesti uz utrošak energije pri tome. Ako se proizvodi iz prirodnog plina, ostvaruje se danas energetska korisnost plin-vodik od 80 do 85 posto, uz emisiju ugljikova dioksida (!). Da se proizvodi elektrolizom iz vode, tada bi pretvorba električna energija-vodik-električna energija bila ostvarena uz stupanj djelovanja manji od 28 posto, a bez emisije ugljikova dioksida. Ipak, gorivne ćelije danas se koriste prvenstveno iz ekoloških razloga ali na mjestu njihova korištenja; tu nastaje otpadna voda kao nusprodukt pretvorbe. Koriste se najčešće u kućanstvima i javnim ustanovama za spojenu proizvodnju manjih količina električne i toplinske energije, koliko je potrebno tim kućanstvima, odnosno tim ustanovama. Služe i za pogon elektromobila gdje se proizvedena električna energija usmjerava za korištenje elektromotorima koji pogone pogonske kotače automobila. Gorivna ćelija daje istosmjerni napon nešto niži od jednog volta, a više ćelija slaže se u ćelijski blok ukupnog istosmjernog napona od oko 200 volta. Gorivne ćelije odlikuju se visokim stupnjem djelovanja, praktična ostvarenja su sa stupnjem djelovanja (vodik-električna energija) u području 35 do 60 posto. Ipak, današnja masovna opskrba električnom energijom korištenjem gorivnim ćelijama još uvijek nije dovoljno ekonomična i ekološki privlačna jer se ukupna energetska pretvorba (prirodni plin – vodik – električna i toplinska energija) obavlja uz nedovoljni stupanj djelovanja i uz emisiju $CO_2$.

## Magnetohidrodinamski generator

Magnetohidrodinamski generator (MHD-generator) služi za izravnu pretvorbu kemijske energije goriva u električnu energiju. U magnetskom polju struji zapaljeno gorivo u stanju ionizirane plazme, pri vrlo visokoj temperaturi od oko 3 000 °C, te se javljaju sile u djelovanju na ione – pozitivne i negativne, koje ih razdvajaju. Razdvojeni ioni prikupljaju se na elektrodama između kojih se uspostavlja električni napon koji može tjerati struju vanjskim krugom i time je ostvarena preobrazba u električnu energiju. Stupanj djelovanja te pretvorbe je 10 do 20 posto, a budući da plinovi pri napuštanju MHD-generatora imaju temperaturu od preko 1 000 °C, na izlazu se postavlja konvencionalna parna turbina, pa se ukupni stupanj djelovanja takva sustava podiže na oko 65 posto. Godine 1971. u tadašnjem Sovjetskom savezu pušten je u pogon prvi razvojni MHD-generator, koji je opskrbljivao električnu mrežu Moskve snagom od 25 MW.

## Neka ograničenja pri primjeni nekonvencionalnih izvora energije za proizvodnju električne energije

Nekonvencionalni izvori energije (danas tehnološki raspoloživi i ekonomski dostižni: hidroenergija za male HE – u pravilu: snage do 10 MW, Sunčevo zračenje, vjetar, ogrjevno drvo

i druga biomasa, bioplin i otpad, geotermalna energija)[64] često se uzimaju kao *spasonosno* rješenje u budućoj opskrbi energijom. Poistovjećuje ih se i s obnovljivim izvorima energije, što nije ispravno jer velike hidroelektrane (u pravilu: snage veće od 10 MW) također koriste obnovljivi izvor energije, a konvencionalne su. Također, često se njihovo korištenje suženo poima samo kao izvor za preobrazbu u električnu energiju, što opet nije točno jer ti se izvori mogu koristiti *i koriste se naglašenije* i bez prethodne pretvorbe u električnu energiju.

U nešto daljoj budućnosti (nekoliko desetaka godina unaprijed), moguće su prilike u kojima će neki nov način korištenja nekonvencionalnim izvorima, ili čak neki novi izvor, toliko napredovati u svome razvoju da će to predstavljati bitni preokret u odnosu na sadašnje stanje i sagledavanje.

Direktivom Europske Unije 2001/77/EC određeno je da će 2010. godine udio svih obnovljivih izvora (dakle uključivo i velikih hidroelektrana) u namirenju brutopotrošnje električne energije porasti na 21 posto s 12,9 posto, koliko je ostvareno u 1997. godini. Na *summitu* Europske Unije, 9. ožujka 2007. u Bruxellesu, utvrđen je novi cilj ali za 2020. godinu: iz obnovljivih izvora namiriti 20 posto ukupne potrošnje energije (dakle ne samo potrošnje električne energije), sa sadašnjih oko sedam posto.

Svojstva nekonvencionalnih izvora energije ne možemo promatrati izdvojeno od općenito znanih svojstava konvencionalnih izvora, tek usporedbom s tim svojstvima možemo utemeljeno kvalificirati nekonvencionalne izvore. Neka su svojstva nekonvencionalnih izvora poželjna a neka nepoželjna.

## Pretežno dobra svojstva nekonvencionalnih izvora energije

*Obnovljivost* pojedinog izvora energije najlakše poimamo ako kažemo kako je obnovljiv izvor onaj čiji se prosječni dotok svake godine ponavlja, bez smanjenja – barem za ljudsko poimanje vremena. Dakle, svi promatrani nekonvencionalni izvori su obnovljivi.

Općenito, nekonvencionalni izvori imaju golem *potencijal* – što je poželjno svojstvo. Sa Sunca na tlo Hrvatske dostruji približno 500 puta više energije nego što je godišnja hrvatska potrošnja svih oblika energije! Ipak, male hidroelektrane predstavljaju ograničeni potencijal, kojeg naprosto nema na znatnom dijelu golemih prostranstava globusa[65]. Biomasa, bioplin i otpad predstavljaju veći potencijal od malih hidroelektrana, ali ipak znatno manji od energije Sunčeva zračenja. Geotermalna energija ima pri današnjem načinu korištenja ograničeni potencijal[66], ali prikriveni potencijal je ogroman, ako dođe do prihvatljivog korištenja toplinom Zemljine nutrine s velikih dubina.

---

[64] Ovdje ne razmatramo primjenu gorivnih ćelija ni vodikovu tehnologiju! Dakako, jer se tu uopće nije riječ o prirodnim oblicima energije, nego o osobitom tipu pretvorbe jednog oblika energije u povoljniji oblik (gorivne ćelije) ili o pretvorbi neke raspoložive tvari u vodik (jer ga nema u prirodi) uz ukupno ulaganje više energije u tu pretvorbu nego što će se dobiti iskorištavanjem vodika. Ne razmatramo, također, danas sporadično ili pokusno primjenjivane elektrane na nekonvencionalne izvore, primjerice: plimu i oseku te morske valove. Ali opća razmatranja mogu se proširiti i na njih.

[65] U Hrvatskoj postojeće velike HE imaju ukupnu snagu 2 060 MW i prosječno moguću godišnju proizvodnju električne energije oko 5 700 GWh. Buduće velike HE mogu dostići još 1 400 MW uz proizvodnju 6 000 GWh, u tome za Hrvatsku oko 1 000 MW uz 4 600 GWh, jer se dijelom koriste međudržavne rijeke. Postojeće male HE imaju ukupnu snagu 17 MW i prosječnu godišnju proizvodnju 70 GWh. Potencijalne male HE na 700 lokacija (!) mogu dostići ukupnu snagu od 177 MW i prosječnu godišnju proizvodnju od 570 GWh, dakle po prosječnoj lokaciji 250 kW/800 MWh.

[66] Procijenjeni potencijal *geotermalne energije* u Stategiji energetskog razvitka Hrvatske, usvojenoj 2002. godine [50], je toplinskih oko 800 MW. Uz godišnje 100-postotno iskorištenje (8 760 sati/god), taj potencijal predstavlja godišnju energiju od oko 7 TWh ili 25 PJ. Opširnije o Strategiji energetskog razvitka Hrvatske vidjeti u poglavlju 23.

Ima li se na umu *energija potrebna za proizvodnju opreme i materijala* koje treba ugraditi u postrojenja za korištenje nekonvencionalnim izvorima, a ne samo toj energiji adekvatan novac, onda izlazi da pojedini izvor mora neprekidno raditi i nekoliko godina, da bi tek tada postao neto-proizvođač energije[67]. Jer treba proizvesti cement, čelik, staklo, aluminij i razne druge materijale. A kako za pojedine oblike energije treba mnogo takvog materijala (temelji i nosači fotoćelija i kolektora, same fotoćelije i kolektori, visoki betonski ili čelični stupovi vjetrogeneratora) to se energija za njihovu proizvodnju ne smije zanemariti. Naglašeni utrošak energije je pri proizvodnji fotoćelija.

Kod većine nekonvencionalnih izvora nema utroška energije prilikom *pridobivanja izvornog oblika* (kao što postoji značajan utrošak energije pri eksploataciji ugljenokopa), niti utroška energije za transport izvornog oblika, jer je transport u pravilu nemoguć. Treba naprosto postrojenja za pretvorbu nekonvencionalnog izvora u povoljniji oblik *izložiti* djelovanju tog nekonvencionalnog izvora. Jedino se kod ogrjevnog drveta, biomase i otpada javljaju ti utrošci energije (koji mogu biti toliko značajni da cijela stvar postane neracionalna), primjerice za sječu drvne mase, za nadoknadno pošumljavanje i uzgoj šume, za transport od mjesta sječe do mjesta korištenja te za pripremu drveta za korištenje. Slično je s biomasom, bioplinom i otpadom, jedino tu može izostati utrošak pri uzgoju jer se uzgoj odvija neovisno od eventualnog energetskog korištenja, primjerice slama nastaje kao rezultat poljoprivredne proizvodnje pšenice, pa će ili strunuti ili se energetski iskoristiti.

Lokalno *opterećenje okoliša* emisijom štetnih tvari ili bukom na mjestu pretvorbe nekonvencionalnog oblika energije u iskoristiviji oblik općenito je maleno ili ga uopće nema. Ali korištenje vjetrom izaziva buku, a izgaranje biomase izaziva emisiju plinova eventualno manje štetnih od konvencionalnih goriva jer praktički nema sumpora (kao u ugljenu ili nafti). Ipak je emisija iz tih postrojenja nešto veća nego li iz konvencionalnih postrojenja, jer riječ je o manjem stupnju djelovanja pri pretvorbi energije i manjim jedinicama. Emisija kod korištenja otpad može biti i opasna ako se prethodno iz otpadaka (smeća) ne izdvoje evidentno štetni sastojci.

Najznačajnije praktično poželjno svojstvo nekonvencionalnih izvora energije je mogućnost posvemašnje diversificirane primjene. Praktički, svi izvori nekonvencionalne energije – dakako, ako su raspoloživi na promatranom mjestu – mogu se koristiti *u malome*, u vlastitoj režiji, djelomice ili potpuno u samogradnji – time se trošak rada pri instaliranju, pogonu i održavanju praktički dade izbjeći ili barem prikriti („*radim za sebe, u slobodno vrijeme – dakle besplatno*").

Konačno, o kumulativnoj *$CO_2$-neutralnosti* nekonvencionalnih izvora energije. Kumulativnoj, znači promatranoj u ukupnom energijskom lancu – od pridobivanja energije, izrade i montaže pogonskih uređaja, do korištenja i zbrinjavanja nakon korištenja. Iako se često govori o $CO_2$-neutralnosti apsolutno svih nekonvencionalnih izvora, najčešće se misli na tu neutralnost prilikom pretvorbe nekonvencionalnog oblika u iskoristiviji oblik i tada je takvo gledanje točno. Za biomasu to je dakako ispunjeno samo ako je godišnje iskorištavanje mase jednako ili manje od godišnjeg prirasta nove mase. Tada će emisija $CO_2$ pri korištenju tom biomasom biti jednaka emisiji $CO_2$ prilikom fotosinteze te biomase. Međutim, ako se ima na umu proizvodnja cementa, čelika, stakla i raznih drugih potrebnih materijala za izgradnju fotoćelija a donekle i kolektora, onda izlazi kako je primjena Sunčeva zračenja kumulativno „kvazi-$CO_2$-neutralna", a emisija ostalih postrojenja na nekonvencionalne izvore je manja od kumulativne emisije $CO_2$ iz konvencionalnih elektrana[68].

---

[67] Govorimo o vremenu *energetske amortizacije*; vidjeti dalje u ovom poglavlju (tablica 6.3).

[68] O izravnoj i neizravnoj emisiji $CO_2$ iz elektrana vidjeti u poglavlju 14 (tablica 14.1).

# U pravilu: nepoželjna svojstva nekonvencionalnih izvora energije

*Površinska distribucija* (površinska raspodjela) Sunčeva zračenja po Zemlji *najpravednija* je od svih prirodnih oblika energije, donekle biomase i otpada (otpada ima svugdje gdje ima aktivnosti ljudi a tu je potrebna i energija, nema ga tamo gdje nema nikakve ljudske aktivnosti pa tamo nema niti potrebe za energijom). Ostali nekonvencionalni oblici energije nisu ravnomjerno raspoređeni po globusu.

*Površinska gustoća* mala je za Sunčevo zračenje, još manja za biomasu, bioplin i otpad, te nešto veća za vjetar (tamo gdje ga uopće ima raspoloživog za energetsko korištenje), jedino je kod malih hidroelektrana i kod toplih izvora površinska gustoća primjereno visoka. Na jedan četvorni metar na našoj geografskoj širini dostruji godišnje 1 200-1 600 kilovatsati Sunčeva zračenja, a ako uzgojimo pšenicu na tom četvornom metru, slama će imati energetski sadržaj od samo 2 kilovatsata. Gdje je to u usporedbi s naftnom bušotinom s godišnjim iscrpkom od recimo 100 tisuća tona čiji je energetski sadržaj otprilike 1 milijarda kilovatsati a zauzima ploštinu tla od par stotina četvornih metara?!

Općenito, izvorno se ne daju transportirati gotovo svi nekonvencionalni oblici energije, kao ni *uskladištiti* u izvornom obliku. Moraju se trošiti na mjestu i u ritmu svoga nastanka. Jedino se ogrjevno drvo te ostala biomasa i otpad daju transportirati na razumno veliku udaljenost (jer bi pretjerana udaljenost tražila više energije za transport od energetskog sadržaja tvari koja se prevozi, pa bi to bilo energetski nerazumno) i svakako se daju uskladištiti i koristiti u ritmu potreba.

*Oscilacija prirodnog dotoka* velika je kod svih nekonvencionalnih oblika energije, jedino geotermalna energija ne poznaje oscilaciju, ravnomjerno dotječe iz svog izvora. Gotovo ravnomjeran je i dotok bioplina i otpada. Donekle je oscilacija dotoka ogrjevnog drveta manja a uzevši u obzir i mogućnost njegova uskladištavanja, oscilacija se može kompenzirati. Biomasa sazrijeva praktički trenutno i onda se to ponavlja tek – u pravilu – za godinu dana. Vjetar ima oscilaciju od nula do *preko sto posto*, jer pri olujnom vjetru mora se obustaviti korištenje vjetrogeneratorom, kao i pri vrlo malim brzinama vjetra. Kako je snaga vjetrene turbine proporcionalna brzini vjetra na treću potenciju, to i mala promjena brzine predstavlja znatniju promjenu snage. Udvostručenje brzine vjetra vodi uosmerostručenju snage! Sunčevo zračenje jednako tako predstavlja izvor s oscilacijom od 0 do 100 posto, jer ga noću uopće nema. Male HE također mogu biti na takvim vodotocima, koji u određenim prilikama znaju posve presušiti[69].

Trajanje iskorištenja instalirane snage, dakle omjer godišnje proizvedene energije i instalirane snage, malo je kod svih izvora čije su prirodne oscilacije velike, jer su samo mali dio godišnjeg vremena *u punom pogonu*. Za sve oblike energije čije je trajanje godišnjeg iskorištenja malo mora se osigurati akumulacija energije, pa je onda koristiti iz akumulatora ako je dotok malen ili posve izostao a potražnja postoji. Ali, akumulacija praktički dolazi u obzir kod toplinskog korištenja Sunčevim zračenjem (akumulator je dobro toplinski izoliran bojler) ili akumulacija manje količine električne energije u električnom akumulatoru kod fotonaponskog korištenja Sunčevim zračenjem. Veću količinu električne energije ne može se ekonomično akumulirati u akumulatorima jer bi oni bili velikih masa i time preskupi, tako

[69] I velike hidroelektrane imaju vrlo naglašenu varijaciju proizvodnje, primjerice u Hrvatskoj: od 3,5 TWh/god (u sušnoj godini) do 7 TWh/god (u vlažnoj godini).

da se praktički kod svih drugih obnovljivih izvora poseže za elektroenergetskim sustavom kao rezervnim rješenjem ili dizel-generatorom. Primjena nekomercijalnih goriva: ogrjevno drvo, ostala biomasa i otpad te geotermalna energija ne traže takvu rezervu[70].

*Potrebna rezerva* u konvencionalnim postrojenjima može biti znatna, praktički može doći do udvostučenja instalacije na nacionalnoj razini. S jedne strane instaliramo postrojenja na nekonvencionalni izvor, a s druge strane isto toliku konvencionalnu rezervu[71], koja će – k tome – biti slabije iskorištena jer će raditi uz nepovoljan stupanj djelovanja u razdobljima kada je nekonvencionalni izvor raspoloživ. Regulacijska svojstva takve rezerve moraju biti iznimno visoka jer je za dio nekonvencionalnih izvora karakteristična njihova brza a teško predvidljiva promjena. Prijenosna električna mreža, koja povezuje područja gdje su takvi nekonvencionalni izvori s područjima u kojima je konvencionalna rezerva, također mora biti pojačana.

*Zauzimanje prostora* na mjestu pretvorbe prirodnog oblika energije u iskoristiviji oblik veliko je pri korištenju onim nekonvencionalnim oblicima, čija je površinska gustoća mala. Za fotonaponsko korištenje Sunčevim zračenjem to je izrazito naglašeno[72], a kod korištenja vjetrom[73] i kolektorskog korištenja Sunčevim zračenjem nešto manje. Ogrjevno drvo te ostala biomasa i otpad traže nešto više prostora od onoga kojeg bi tražila konvencionalna termoelektrana jednake snage, uz nešto veći skladišni prostor. Ogrjevno drvo može se i izravno koristiti – u štednjaku za kuhanje, peći za zagrijavanje prostora ili sanitarne vode – pa onda traži samo prostor za uskladištavanje. Geotermalna energija, ukoliko se koristi neposredno za zagrijavanje, troši najmanje prostora.

*Stupanj djelovanja* pri pretvorbi u koristan oblik općenito je malen ili manji nego li kod konvencionalnih izvora energije. Osobito je to naglašeno kod fotonaponskog korištenja

---

[70] Te je aktualni udio biomase i otpada čak oko 2/3 u *ukupnom* energetskom korištenju obnovljivih izvora u EU-25 (2004) (vidjeti sliku 3.7)! U Hrvatskoj, ništa ne poduzimamo da uzdržimo korištenje ogjevnog drva barem na zatečenoj razini (od '90. godina na ovamo imamo zapravo blagi ali uporni pad toga korištenja) i nedovoljno se trudimo da, prema najnižem scenariju (S1) u Strategiji energetskog razvitka Hrvatske, usvojenoj 2002. godine [50], korištenje biomase udvostručimo do 2030. godine. Nesmotrenom plinofikacijom možemo još i dalje umanjiti korištenje ogrjevnog drva, pak ćemo se u primjerice Lici grijati na plin, a primjerice za Vinkovce ćemo tvrditi da treba uvesti korištenje slame, jer da je to *ekološki privlačno*.

[71] Nijemci za 1 MW u vjetroelektranama drže rezervu od 0,85 – 0,95 MW u konvencionalnom elektroenergetskom sustavu [52], dakle – praktički – udvostručuju instalaciju vjetroelektrana, jednom u vjetroelektranama a drugiput u konvencionalnom sustavu!

[72] Najodlučnijim scenarijem (S3) u Strategiji energetskog razvitka Hrvatske [50], predviđeno je 2030. godine dosegnuti 35,1 PJ korištenja Sunčeva zračenja. Uz koeficijent 3,6 PJ/TWh, to predstavlja oko 10 TWh. Uz godišnju imisiju Sunčeva zračenja od 1 200 kWh/m$^2$ pri kolektorskom toplinskom korištenju, potrebna ploština kolektora je $12 \times 10^9$ kWh podijeljeno s $10^3$ kWh, dakle 12 milijuna kolektora jedinične ploštine 1 m$^2$. Ukupno treba instalirati dakle oko 6 takvih kolektora po prosječnom hrvatskom kućanstvu (ugrađenih, dakako, dijelom doista po kućanstvima, a dijelom u industriji i ostalim djelatnostima – hotelima, bolnicama, ustanovama...). Moguće realno, ali uz kontinuirane napore koji su danas potpuno izostali! U Rovinju imamo iz luke vidljivih barem 500 televizijskih paraboličnih antena za satelitski prijem, a vidljivog kolektora niti jednoga! Planiranom plinofikacijom duž Jadrana, zauvijek će izostati ugradnja kolektora a tu ugradnju bi svakako trebalo potaknuti, prije plinofikacije.

[73] Razvoj po najnižem scenariju (S1) u Strategiji energetskog razvitka Hrvatske [50] predstavljao bi dosezanje granice danas utvrđenog potencijala *vjetroelektrana* (400 MW/800 GWh) u 2030. godini. Drugi scenariji predviđaju udvostručenje (S2) odnosno učetverostručenje (S3) tog potencijala. Je li to realno?
Prema S3 to bi značilo izgradnju preko 1 500 vjetroturbina s 50-metarskim tornjevima, sličnih onima u prvoj našoj vjetroelektrani na Pagu (850 kW)! Ili, duž jadranske obalne crte (na otocima i unutar pojasa od tisuću metara od obale, uredbom je Vlade zabranjena gradnja vjetroelektrana) na svakih 300 metara zračne linije postavljanje jedne slične vjetroturbine!? Dakako, to je samo slikoviti prikaz; u stvarnoj izvedbi radit će se dijelom o vjetroturbinama veće snage od onih na Pagu a gradit će se u skupinama (*vjetroelektranskim parkovima*) a ne pojedinačno.

Sunčevim zračenjem, kod kojeg je prosječni stupanj djelovanja samo oko 10 posto, dakle za jedan kilovatsat dobiven iz sunčanih ćelija treba izložiti toliko površine da bude osunčana s deset kilovatsati. Veći je kod malih hidroelektrana, toplinskog korištenja Sunčevim zračenjem kolektorima i neposrednog, dakle toplinskog iskorištavanja geotermalne energije.

Suvremeni energetski pristup zalaže se za primjenu *kogeneracije* – dakle spojenu proizvodnju toplinske i električne energije, što je više moguće, jer se time postiže veće iskorištenje prirodnog oblika energije. Moguća je samo kod nekonvencionalnih izvora iskorištenih kao gorivo u termoelektrama-toplanama (nekomercijalna goriva) ili ako se geotermalna energija koristi za pogon takve elektrane, dakle mora se raditi o vrlo vrućem izvoru (kakvih ima na Islandu). Također, u blizini postrojenja za pretvorbu mora biti primjereno velika toplinska potrošnja, inače se nema kamo isporučivati proizvedena toplina.

Sva ta nabrojana svojstva nekonvencionalnih izvora – osobito ona nepovoljna – razlog su velike proizvodne cijene tih izvora, danas još na granici ili znatno iznad granice cijene konvencionalnih izvora, te države propisuju zajamčene otkupne cijene iz tih izvora[74].

Istodobno, države uvode naknade koje plaćaju svi kupci električne energije kao bi se stvorili fondovi za otkup električne energije iz nekonvencionalnih izvora. U Hrvatskoj, Zakonom o energiji također je uvedena naknada za poticanje proizvodnje električne energije iz nekonvencionalnih izvora koju će plaćati svi kupci, Vlada je utvrdila iznos te naknade i ubiranje naknade počinje od 1. srpnja 2007. godine[75].

## Energijski omjer (*energija za energiju*)

Zaključno raspravimo još i tzv. *energijski omjer*; to je omjer energije dobivene iz nekog tipa elektrane tijekom vijeka trajanja te elektrane i energije koja je uložena prilikom izrade opreme i gradnje postrojenja, pridobivanja, transporta i pripreme goriva, te naknadno uložene energije za njezinu razgradnju i zbrinjavanje ostataka, na kraju vijeka trajanja. Kazuje o tome koliko je uopće neko postrojenje ili neki proces energetski razuman, dakle koliko energije treba uložiti za dobivenu energiju. U uloženu energiju *ne* uračunava se energija sadržana u prirodnom izvoru energije.

Primjerice za dobivanje 10 tona nafte iz bituminoznog pijeska danas treba uložiti toliko energije, koliko sadrži 9 tona nafte [8]. Dakle, proces je još uvijek energetski praktički neisplativ. Moguće je zamišljati korištenje kakvom biomasom male površinske gustoće, takvo da je uložena energija za prikupljanje i transport te biomase do elektrane veća od energije koja bi se pridobila iskorištavanjem te biomase u elektrani. Jasno je da bi takvo korištenje bilo posve nerazumno.

Energijski omjer teško je egzaktno utvrditi, ovisi o brojnim pretpostavkama i prilikama konkretnog postrojenja. Prvo dvojbeno pitanje je pretpostavljeni vijek trajanja, jer će o njegovoj duljini ovisiti dobivena energija. Stoga razni izvori navode donekle različite vrijednosti energijskog omjera za iste tipove elektrana.

---

[74] Uz prosječnu tržišnu europsku cijenu temeljne energije iz konvencionalnih elektrana od 3-3,5 eurocenta/kWh (2004), garantirana otkupna cijena iz malih HE kretala se između 3,2 i 8,4 eurocenta/kWh, iz vjetroelektrana između 4,7 i 11,3 eurocenta/kWh, iz elektrana na biomasu između 4,5 i 16 eurocenta/kWh, iz sunčanih elektrana između 15,3 i 60 eurocenta/kWh, te iz geotermalnih elektrana između 7,1 i 8,9 eurocenta/kWh, ovisno o pojedinim europskim državama [59].

[75] Detaljnije vidjeti u poglavlju 20 (tablica 20.2).

Tako, primjerice prema [18][76] energijski je omjer nuklearnih elektrana 24, termoelektrana na ugljen 17, a sunčanih elektrana samo 5. Dakle, nuklearne elektrane traže ulaganje energije od oko četiri posto dobivene električne energije, a sunčane elektrane čak 20 posto.

*Tablica 6.2. Energijski omjer različitih tipova elektrana*

| Tip elektrane | Energijski omjer | Uložena energija (%) |
|---|---|---|
| Hidroelektrana | 43-205 | 0,5-2,3 |
| Nuklearna elektrana PWR, centrifugalno obogaćivanje goriva | 46-59 | 1,7-2,3 |
| Nuklearna elektrana PWR, difuzijsko obogaćivanje goriva | 15-21 | 4,2-9,5 |
| Termoelektrana na ugljen | 7-34 | 2,9-14 |
| Termoelektrana na prirodni plin | 6-26 | 3,8-20 |
| Sunčana elektrana | 10,6 | 9,4 |
| Sunčana fotonaponska elektrana | 3,7-12 | 8-27 |
| Vjetroelektrana | 6-80 | 1,3-16,7 |

*Energijski omjer = Dobivena energija tijekom vijeka trajanja/ Uložena energija*
*Uložena energija (%) = 100×Uložena energija / Dobivena energija tijekom vijeka trajanja*

Recentno izneseni australski podaci u [50][77] prikazuju se u tablici 6.2. Podaci su utvrđeni na konkretnim primjerima pojedinih tipova elektrana iz svijeta, stoga su u toliko širokim granicama. U tablici je prikazana i uložena energija u postocima dobivene energije tijekom vijeka trajanja postrojenja; to je postotno iskazana recipročna vrijednost energijskog omjera. Uložena energija kreće se od samo 0,5 posto (za neke hidroelektrane) do 27 posto (za sunčane fotonaponske elektrane s monokristalnim ćelijama).

Postoji još jedan možda prikladniji način prikaza iste stvari. Riječ je o takozvanom *trajanju energetske amortizacije*; to je vrijeme potrebno da proteče pri korištenju pojedinim tipom elektrane da se *vrati* energija prethodno uložena za izradu opreme i gradnju postrojenja te naknadno uložena energija za njegovu razgradnju, na kraju vijeka trajanja. Tek nakon isteka vremena energetske amortizacije, elektrana počne biti neto-proizvođač energije. Trajanje energetske amortizacije za neke tipove energetskih postrojenja prikazano je tablicom 6.3.

*Tablica 6.3. Trajanje energetske amortizacije (godina)*

| Tip energetskog postrojenja | Energ. amortizacija |
|---|---|
| Hidroelektrana | 0,2-0,3 |
| Toplana za daljinsko grijanje | 0,2-0,5 |
| Nuklearna elektrana (PWR) | 0,2-0,8 |
| Vjetroelektrana | 0,2-1,9 |
| Sunčani kolektor | 0,6-3,5 |
| Fotonaponska-amorfne ćelije | 2,6-4,6 |
| Fotonaponska-multikristalne ćelije | 3,1-6,8 |
| Fotonaponska-monokristalne ćelije | 4,2-7,1 |

*Izvor: Elektrizitätswirtschaft 8/1996*

[76] D. Feretić i dr: *Elektrane i okoliš*, str.270.
[77] Energy Analysis of Power Systems, UIC/Australija, 2006.

Vidimo kako u prvoj grupi postrojenja dolazi do energetske amortizacije u trajanju znatno manjem ili manjem od godinu dana, da kod vjetroelektrana to znade iznositi i gotovo dvije godine, a kod sunčanih fotonaponskih elektrana od dvije i pol do čak sedam godina! Ovisi o tehnološkoj zgotovljenosti sunčanih ćelija koje se primjenjuju: amorfni kristali su najjeftiniji, ostvaruju najmanji stupanj djelovanja pri pretvorbi energije Sunčeva zračenja u električnu energiju, ali traže i najmanje energije za njihovu izradu. Najbolje su monokristalne ćelije, ali su najskuplje i traže najviše energije.

## Struktura proizvodnje električne energije po tipovima elektrana

U sadašnjoj (2003. godine) ukupnoj *svjetskoj* proizvodnji električne energije od 16 661 TWh, prema podacima IEA, točno 2/3 udjela u toj proizvodnji ostvaruje se u konvencionalnim termoelektranama, podjednako – po oko 16 posto – u nuklearnim elektranama i hidroelektranama, te oko 2 posto u elektranama na nekonvencionalne izvore energije; tablica 6.4.

Ostvareno je veliko povećanje udjela proizvodnje u nuklearnim elektranama, porast od 3,4 (1973) na 15,8 posto (2003), došlo je do bitne preraspodjele između plina i nafte kao goriva u elektranama. Električna energija proizvedena u elektranama loženim naftom smanjena je s oko 25-postotnog udjela (1973) na samo 6,9 posto (2003), a udio proizvodnje u elektranama loženim plinom povećan je s 12 posto na 19,4 posto. Elektrane koje koriste ugljen kao gorivo nešto su povećale svoj udio: s 38-postotnog (1973) njihov je udio u proizvodnji električne energije porastao na 40 posto (2003).

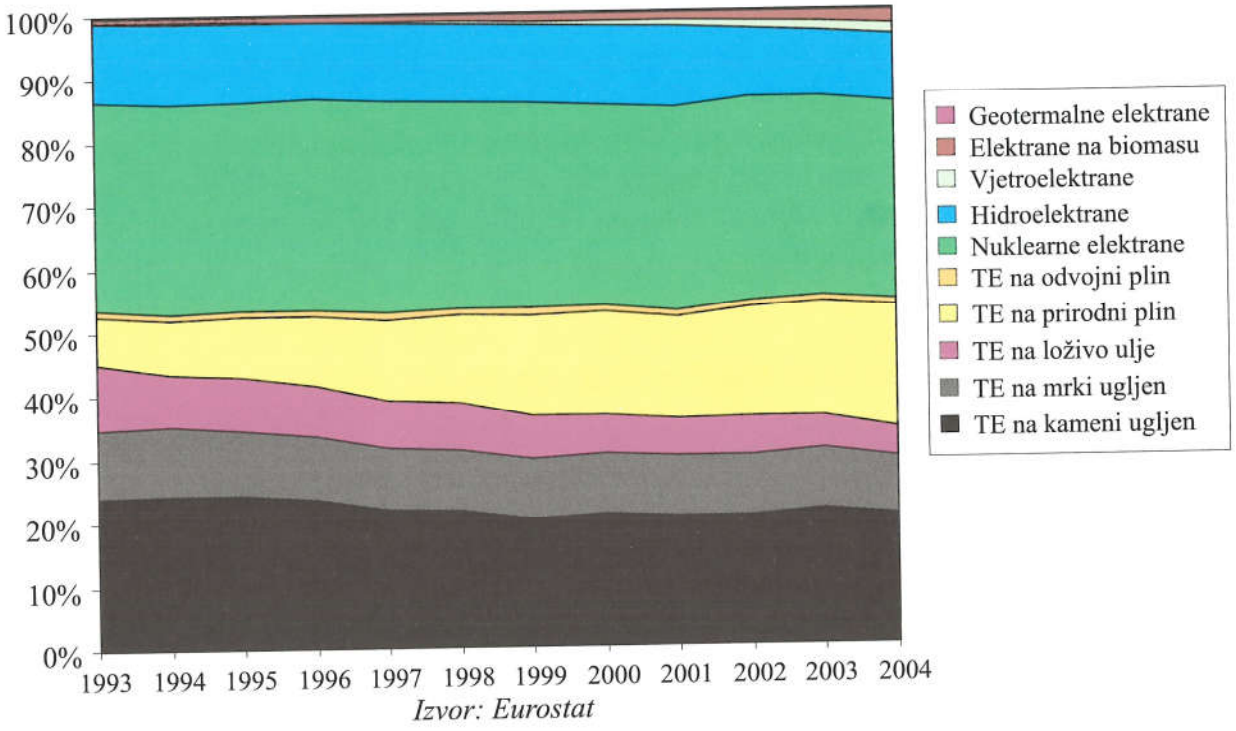
*Tablica 6.4. Brutoproizvodnja električne energije u svijetu*

| Tip elektrane | 1973 | | 2003 | |
|---|---|---|---|---|
| | TWh | % | TWh | % |
| Konvencionalne termoelektrane-ugljen | 2 335 | 38,2 | 6 681 | 40,1 |
| Konvencionalne termoelektrane-nafta | 1 509 | 24,7 | 1 150 | 6,9 |
| Konvencionalne termoelektrane-plin | 739 | 12,1 | 3 232 | 19,4 |
| Nuklearne elektrane | 208 | 3,4 | 2 632 | 15,8 |
| Hidroelektrane | 1 283 | 21,0 | 2 649 | 15,9 |
| Elektrane na ostale obnovljive izvore | 37 | 0,6 | 317 | 1,9 |
| Ukupno | 6111 | 100 | 16 661 | 100 |

*Izvor: Key World Energy Statistics 2005, IEA*

Godine 2003. instalirana snaga nuklearnih elektrana u svijetu bila je 361 GW, najviše u SAD (98 GW), slijede Francuska (63 GW) i Japan (44 GW). Te godine, instalirana snaga hidroelektrana u svijetu bila je 807 GW, najviše u SAD-u (99 GW), Kini (86 GW) i Kanadi (67 GW).

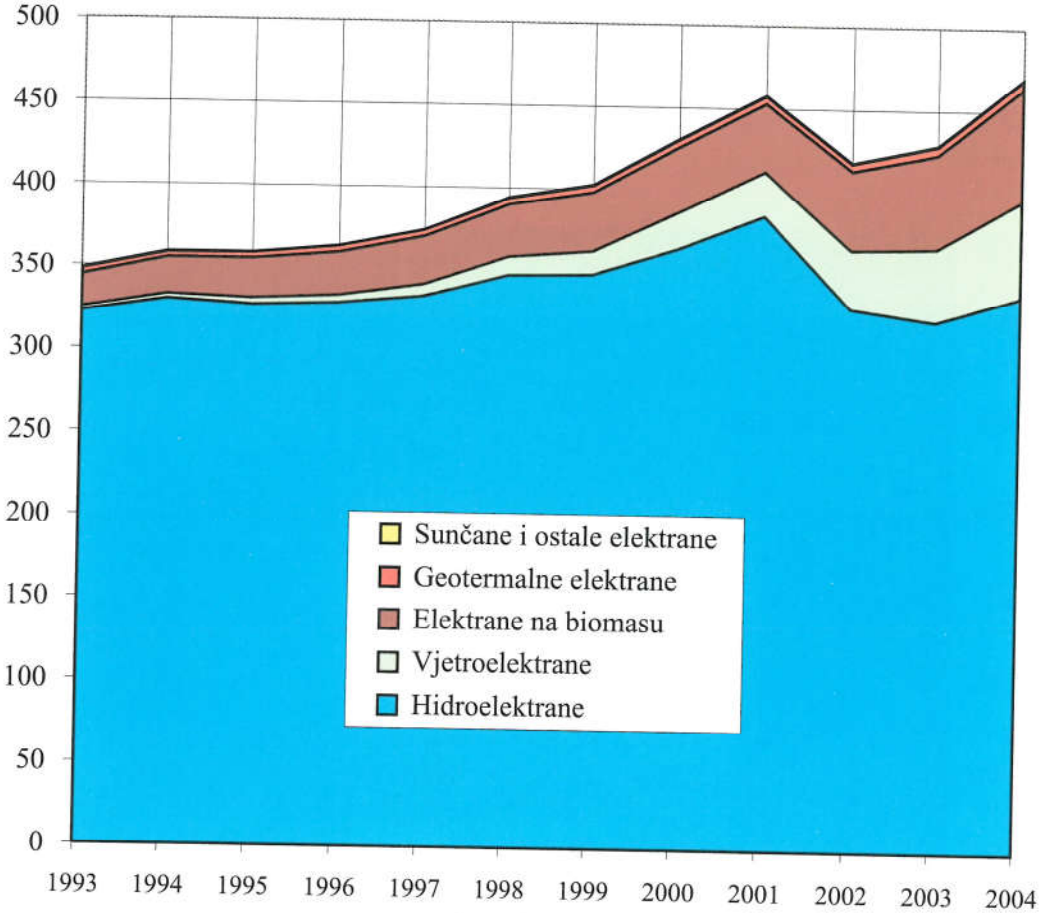
Godine 2004. u ukupnoj brutoproizvodnji električne energije u *Europskoj Uniji* (EU-25) od 3168 TWh, najveći udio imaju konvencionalne termoelektrane: 54,1 posto. Slijede nuklearne elektrane s udjelom od 31,1 posto, te hidroelektrane (velike i male HE) s udjelom od 10,6 posto. Ostale elektrane na nekonvencionalne izvore energije imaju udio od 4,2 posto.




*Slika 6.18. Udjeli elektrana u brutoproizvodnji električne energije u EU-25*

U posljednjih desetak godina bitnije se promijenila struktura proizvodnje električne energije po tipovima elektrana u Europskoj Uniji (slika 6.18). Najveća promjena zbila se u proizvodnji termoelektrana na prirodni plin, s udjela od 7,4 posto (1993) porastao je njihov udio na 19 posto (2004). Kako ukupni udio konvencionalnih termoelektrana nije bitno promijenjen (iznosi tijekom čitava promatranog razdoblja oko 53 posto), naglašeno je povećanje proizvodnje u termoelektranama loženim prirodnim plinom, ostvareno na račun prigušivanja proizvodnje termoelektrana loženih loživim uljem (s udjela od 10,5 posto pala je ta proizvodnja na udio od 4,5 posto) te termoelektrana na kameni ugljen (čiji udio u proizvodnji pao je od 24,1 na 20,4 posto). Termoelektrane na mrki ugljen neznatno manje sudjeluju u proizvodnji električne energije (pad udjela s 10,6 na 9,1 posto). Proizvodnja u nuklearnim elektranama neznatno se smanjila prema svome udjelu (s 32,9 na 31,1 posto). U hidroelektranama također se nešto smanjio udio (smanjio se s 12,5 na 10,6 posto), no, to je podložno i varijacijama zbog vlažnosti, odnosno sušnosti pojedine godine. Udio elektrana na nekonvencionalne izvore energije povećao se (s 2 posto u 1993. godini, porastao je na spomenutih 4,2 posto u 2004. godini).

Razmotrimo još pobliže proizvodnju elektrana na obnovljive izvore energije u EU-25 (slika 6.19), čija se proizvodnja treba povećati s udjela od 12,9 posto (1997) na 21 posto (u 2010. godini) ukupne brutopotrošnje električne energije u svim članicama EU-25. Pri tome, prema Direktivi EU-a o obnovljivim izvorima energije, zadaća pojedinih država članica nije ravnomjerno raspoređena. Ona ovisi o zatečenom udjelu obnovljivih izvora energije 1997. godine, o ograničenjima koja proizlaze iz Kyoto-protokola za pojedinu zemlju, potencijalima neiskorištenih obnovljivih izvora u pojedinoj zemlji, te objektivnim materijalnim mogućnostima pojedine zemlje za veću ili manju primjenu obnovljivih izvora energije.




*Izvor: Eurostat*

*Slika 6.19. Brutoproizvodnja elektrana na obnovljive izvore energije u EU-25* (TWh)

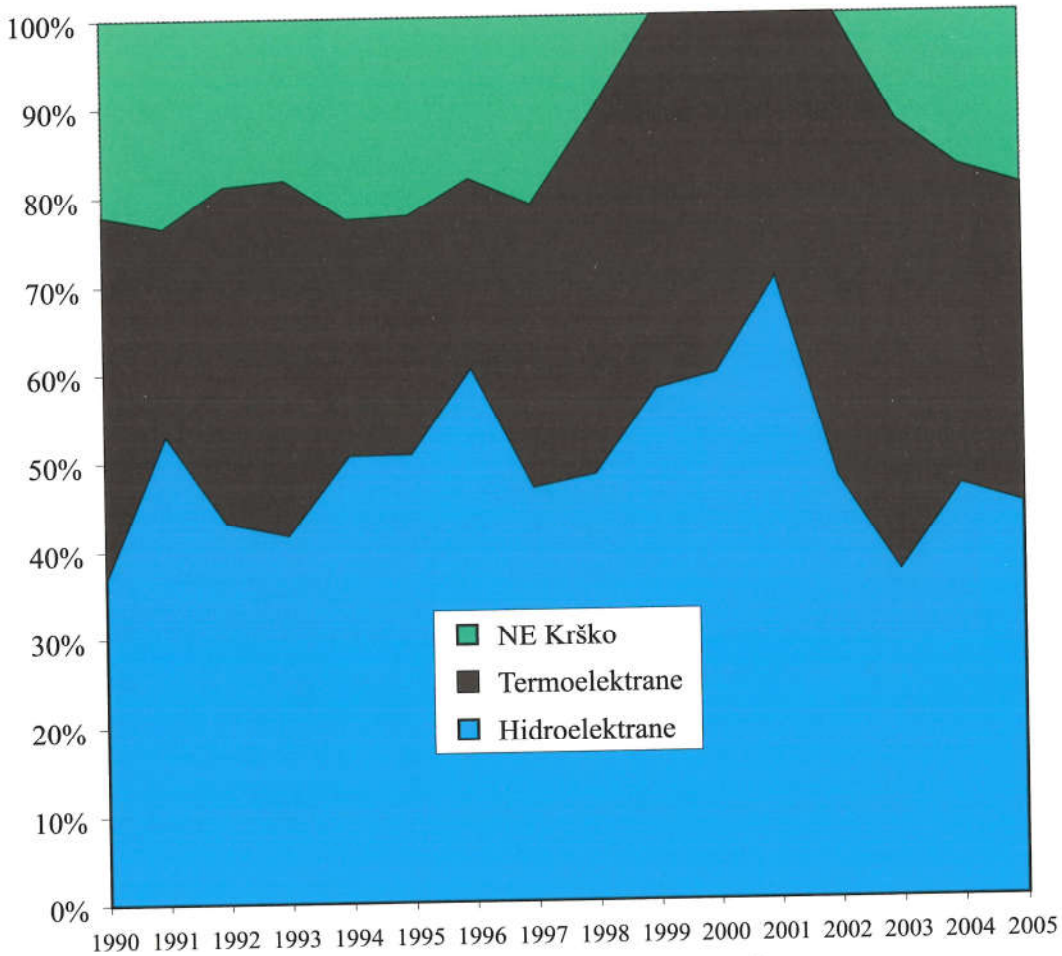
Ostvarena brutoproizvodnja svih elektrana na obnovljive izvore u 2004. godini bila je 470 TWh. Gotovo 3/4 (točno: 71,8 posto) proizvodnje tih elektrana ostvareno je u velikim i malim hidroelektranama (2004). Preostala proizvodnja ostvaruje se: u elektranama na biomasu (14,4 posto), vjetroelektranama (12,5 posto), geotermalnim elektranama (1,2 posto) i neznatnim udjelom (0,1 posto) u ostalim elektranama na obnovljive izvore (primjerice u sunčanim elektranama). U tome, rast proizvodnje u vjetroelektranama najveći je: udio njihove proizvodnje u ukupnoj proizvodnji elektrana na obnovljive izvore u 1993. godini bio je 0,7 posto.

Ostvareni udio proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije u 2004. godini od 470 TWh spram ostvarene brutopotrošnje električne energije u toj godini od 2 982 TWh, je dakle 15,8 posto. To je još vrlo daleko od spomenutog cilja iz Direktive EU za 2010. godinu (21 posto)

Instalirana snaga svih elektrana u EU-25 u 2004. godini bila je oko 700 GW, raspoređenih po pojedinim tipovima elektrana na:

| | |
|---|---|
| – termoelektrane | 394 274 MW |
| – nuklearne elektrane | 132 522 MW |
| – hidroelektrane | 131 367 MW |
| – elektrane na ostale obnovljive izvore | 45 347 MW. |

Vrlo promjenjiva struktura proizvodnje pojedinih tipova elektrana u Hrvatskoj (slika 6.20), posljedica je godišnjih izmjena ostvarene proizvodnje u hidroelektranama, od sušnih (kakve su bile 1990. i 2003. godina) do vlažnih godina (kakve su bile 1991, 1996. i 2001. godina).




*Izvor: God. izvještaji HEP-OPS*

*Slika 6.20. Udjeli elektrana u brutoproizvodnji električne energije u Hrvatskoj*

U sadašnjoj (2005. godine) brutoproizvodnji električne energije u *Hrvatskoj* od 12 459 GWh najveći udio ostvarile su hidroelektrane (6 439 GWh), slijede termoelektrane (3 638 GWh), javne termoelektrane-toplane (1 877 GWh) i industrijske termoelektrane-toplane (505 GWh); ukupna proizvodnja u svim termoelektranama iznosila je 6 020 GWh. Ostvarena je godišnja proizvodnja hidroelektrana od 6 439 GWh (2005), ali ona znatno varira: najmanja proizvodnja u promatranom razdoblju ostvarena je 1990. godine (3 748 GWh), a najveća u istim tim hidroelektranama 1996. godine (7 228 GWh), dakle, varijacija godišnje proizvodnje hrvatskih hidroelektrana mijenja se u omjeru približno 2:1. Dakako, ostvarena proizvodnja u hrvatskim termoelektranama inverzna je proizvodnji u hidroelektranama, a odstupanja od toga posljedica su i većeg ili manjeg angažmana NE Krško za Hrvatsku; u 2005. godini: 2 807 GWh. Time je najmanja proi-

zvodnja u sve tri vrste termoelektrana u promatranom razdoblju ostvarena 1991. godine (3 060 GWh), što je, dakako, posljedica i smanjene potražnje u toj godini zbog ratnih zbivanja, a relativno velike proizvodnje hidroelektrana u toj istoj godini (5 354 GWh). Najveća proizvodnja u svim termoelektranama ostvarena je 2003. godine (7 734 GWh)[78]. U razdoblju od 1999. do 2002. godine, nije bilo isporuke električne energije iz NE Krško za Hrvatsku.

Iz malih hidroelektrana u sastavu HEP-a, ukupne snage 16,7 MW, preuzeta je u 2005. godini energija od 70 GWh. Iz malih hidroelektrana, koje nisu u sastavu HEP-a, ukupne snage oko 4,1 MW, preuzeto je u mrežu oko 13 GWh električne energije. Iz tada jedine vjetroelektrane na otoku Pagu, snage 5,95 MW, preuzeto je 9,5 GWh električne energije. Iz termoelektrane na otpad Jakuševac kod Zagreba, snage 2 MW, preuzeto je 10,9 GWh električne energije. Ukupna snaga poznatih sunčanih sustava za proizvodnju električne energije bila je 2005. godine oko 50 kW, a podaci o ostvarenoj proizvodnji nisu raspoloživi. Iz nekonvencionalnih izvora proizvedeno je u toj godini ukupno 103,4 GWh.

Kada se tome doda proizvodnja u velikim hidroelektranama (6 439 GWh), izlazi da je 2005. godine u Hrvatskoj ukupna proizvodnje iz svih obnovljivih izvora energije bila 6 542 GWh, te je udio proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije u namirenju brutopotrošnje električne energije u toj godini (koja je bila 17 237 GWh) ostvaren je u vrijednosti od 38 posto.

Raspoloživa snaga elektrana 2005. godine u Hrvatskoj bila je ukupno 3 832 MW, raspoređena po pojedinim tipovima elektrana na:

| | |
|---|---|
| – akumulacijske hidroelektrane | 1687 MW |
| – protočne hidroelektrane | 369 MW |
| – termoelektrane | 1120 MW |
| – javne TE-TO | 469 MW |
| – industrijske elektrane | 210 MW |
| – male HE u sastavu HEP | 16,7 MW |
| – male HE izvan HEP | 4,1 MW |
| – vjetroelektrana | 6 MW |
| – sunčane elektrane | 49 kW. |

Polovina NE Krško, koja je u vlasništvu Hrvatske, ima u 2005. godini raspoloživu snagu od 338 MW na pragu elektrane, no u europskim elektroenergetskim bilancama njezina proizvodnja smatra se uvozom u Hrvatsku. Kao što je u bilanci prirodnih oblika energije utrošak nuklearnog goriva iskazan sav u Sloveniji. NE Krško dopunjuje proizvodnju naših elektrana s oko 2-2,8 TWh godišnje.

U tablici 6.5. prikazuje se instalirana snaga elektrana i netoproizvodnja električne energije u europskim državama po pojedinim tipovima elektrana, 2005. godine, kako te podatke donosi Eurelectric.

---

[78] Uz instaliranu snagu svih javnih termoelektrana u Hrvatskoj od oko 1 600 MW te uz trajanje godišnjeg korištenja instalirane snage od 5 500 sati, izlazi da je granično moguća proizvodnja u postojećim termoelektranama oko 8,8 TWh. Naše termoelektrane u promatranom razdoblju najviše su proizvele 2003. godine: tada 7,7 TWh – približavamo se granično mogućoj njihovoj proizvodnji. No, nadamo se skoroj dogradnji termoelektranskog parka u Hrvatskoj, ali do tada porast će i potražnja...

*Tablica 6.5. Instalirana snaga elektrana i netoproizvodnja električne energije u europskim državama, 2005. godine*

| Država | NE (MW) | TE (MW) | HE (MW) | Ostali obnovljivi izvori (MW) | **Ukupno (MW)** | NE (TWh) | TE (TWh) | HE (TWh) | Ostali obnovljivi izvori (TWh) | **Netoproizvodnja (TWh)** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Austrija | 0 | 6199 | 11771 | 1043 | **19 013** | 0,0 | 24,6 | 37,0 | 2,2 | **63,8** |
| Belgija | 5801 | 8673 | 1493 | 385 | **16 352** | 44,9 | 35,6 | 1,3 | 1,1 | **82,9** |
| Cipar | 0 | 988 | 0 | 0 | **988** | 0,0 | 4,3 | 0,0 | 0,0 | **4,3** |
| Češka | 3760 | 11237 | 2166 | 249 | **17 412** | 23,3 | 49,8 | 3,0 | 0,1 | **76,2** |
| Njemačka | 20343 | 80499 | 10390 | 21033 | **132265** | 154,6 | 358,9 | 27,7 | 40,1 | **581,3** |
| Danska | 0 | 9489 | 11 | 3123 | **12 623** | 0,0 | 27,2 | 0,0 | 6,6 | **33,8** |
| Estonija | 0 | 2650 | 5 | 32 | **2 687** | 0,0 | 9,1 | 0,0 | 0,1 | **9,2** |
| Španjolska | 7563 | 39616 | 18399 | 10375 | **75 953** | 55,2 | 176,9 | 22,7 | 24,7 | **279,5** |
| Finska | 2671 | 8625 | 3017 | 2282 | **16 595** | 22,3 | 22,5 | 13,6 | 9,4 | **67,8** |
| Francuska | 63300 | 25300 | 25400 | 1500 | **115500** | 430,0 | 58,9 | 56,0 | 4,3 | **549,2** |
| Ujed.Kraljevstvo | 11850 | 62700 | 4250 | 3000 | **81 800** | 75,3 | 286,5 | 7,5 | 10,3 | **379,6** |
| Grčka | 0 | 9968 | 3105 | 572 | **13 645** | 0,0 | 48,6 | 5,5 | 1,3 | **55,4** |
| Mađarska | 1755 | 6079 | 46 | 200 | **8 080** | 13,0 | 18,0 | 0,2 | 1,4 | **32,6** |
| Irska | 0 | 4800 | 534 | 520 | **5 854** | 0,0 | 22,6 | 1,1 | 1,3 | **25,0** |
| Italija | 0 | 61764 | 21000 | 3998 | **86 762** | 0,0 | 232,7 | 41,9 | 14,1 | **288,7** |
| Litvanija | 1183 | 2495 | 1024 | 5 | **4 707** | 9,6 | 3,2 | 0,8 | 0,0 | **13,6** |
| Luksemburg | 0 | 481 | 1128 | 67 | **1 676** | 0,0 | 3,1 | 0,9 | 0,1 | **4,1** |
| Letonija | 0 | 539 | 1561 | 35 | **2 135** | 0,0 | 1,3 | 3,2 | 0,1 | **4,6** |
| Malta | 0 | 534 | 0 | 0 | **534** | 0,0 | 2,3 | 0,0 | 0,0 | **2,3** |
| Nizozemska | 449 | 18352 | 37 | 2706 | **21 544** | 3,7 | 85,6 | 0,1 | 6,9 | **96,3** |
| Poljska | 0 | 29724 | 2245 | 108 | **32 077** | 0,0 | 141,2 | 3,6 | 0,2 | **145,0** |
| Portugal | 0 | 6882 | 4987 | 1421 | **13 290** | 0,0 | 36,7 | 5,0 | 4,4 | **46,1** |
| Švedska | 8961 | 5280 | 16150 | 2821 | **33 212** | 69,5 | 2,7 | 72,1 | 10,4 | **154,7** |
| Slovenija | 670 | 1341 | 882 | 30 | **2 923** | 5,6 | 5,1 | 3,4 | 0,0 | **14,1** |
| Slovačka | 2460 | 2853 | 2450 | 17 | **7 780** | 16,3 | 8,1 | 4,6 | 0,0 | **29,0** |
| **EU-25** | **130766** | **407068** | **132051** | **55522** | **725407** | **923,3** | **1666** | **311** | **139** | **3039** |
| Švicarska | 3230 | 75 | 13295 | 300 | **16900** | 25,0 | 0,1 | 34,0 | 1,6 | **60,7** |
| Island | 0 | 123 | 1159 | 232 | **1 514** | 0,0 | 0,0 | 7,0 | 1,7 | **8,7** |
| Norveška | 0 | 255 | 27962 | 266 | **28483** | 0,0 | 0,5 | 136,4 | 0,7 | **137,6** |
| Bugarska | 2780 | 5065 | 1800 | 0 | **9 645** | 17,3 | 18,1 | 4,7 | 0,0 | **40,1** |
| Rumunjska | 655 | 10127 | 6215 | 0 | **16997** | 5,1 | 29,0 | 19,9 | 0,0 | **54,0** |
| Hrvatska | 0 | 1645 | 2071 | 6 | **3 722** | 0,0 | 5,2 | 6,4 | 0,1 | **11,7** |
| Makedonija | 0 | 907 | 503 | 0 | **1 410** | 0,0 | 5,0 | 1,5 | 0,0 | **6,5** |
| Turska | 0 | 25844 | 12906 | 70 | **38820** | 0,0 | 116,4 | 39,5 | 0,1 | **156,0** |
| Bosna i Herceg. | 0 | 1957 | 2065 | 0 | **4 022** | 0,0 | 6,6 | 6,2 | 0,0 | **12,8** |
| Srbija i CG | 0 | 5524 | 2731 | 0 | **8 255** | 0,0 | 26,6 | 12,9 | 0,0 | **39,5** |
| EU-25 + ostali | **137431** | **458590** | **202758** | **56396** | **855175** | **970,7** | **1873** | **580** | **143** | **3567** |

*Izvor: Eurelectric*

# Troškovi izgradnje i proizvodne cijene pojedinih tipova elektrana

Troškove izgradnje i troškove pogona (odnosno proizvodne cijene) pojedinih tipova elektrana vrlo je teško univerzalno iskazati.

Troškovi izgradnje najviše ovise o izabranoj tehnologiji, odnosno tipu elektrana. Jedinični troškovi izgradnje (iskazani u eurima/kW) variraju približno unutar područja 1:25. Najprihvatljivije, ali doista najprihvatljivije, može se orijentacijski uzeti da su jedinični troškovi izgradnje konvencionalnih termoelektrana na ugljen oko jedan euro po vatu instalirane snage[79], nuklearnih elektrana dvostruko od toga, a plinskih elektrana oko polovinu toga iznosa. (Ne treba niti isticati: to vrijedi u doba pisanja ove knjige!)

Za pojedini tip elektrane, opet, troškovi izgradnje variraju ovisno o ukupnoj snazi i broju agregata (ako je snaga veća i broj agregata manji – jedinični troškovi su niži), stupnju djelovanja elektrane (veći stupanj djelovanja – viši jedinični troškovi), pouzdanosti pogona (pouzdanija elektrana – viši jedinični troškovi), stupnju primijenjene zaštite okoliša, stupnju automatizacije, raspoloživim mogućnostima hlađenja (protočno ili povratno, za konvencionalne i nuklearne elektrane), ostalim a brojnim uvjetima na pojedinoj lokaciji (topografski, geološki, seizmički, hidrološki..., blizina transportnih putova, zatečene prilike na lokaciji, pogodnost za izgradnju), mogućnostima i načinu priključka elektrane na mrežu i potreba preinaka *u dubini* mreže, o načinu financiranja (vlastitim sredstvima ili kreditom) te izgradnje, o isporučiteljima ključne opreme (afirmiranim ili anonimnim), tečaju valute pri obračunu uvozne komponente, o visini komunalnog i drugih doprinosa za izgradnju; nabrojimo samo važnije čimbenike.

U tablici 6.6 navodimo orijentacijske vrijednosti troškova izgradnje pojedinih tipova elektrana, građene u sadašnje vrijeme, prema različitim izvorima podataka.

*Tablica 6.6. Troškovi izgradnje različitih tipova elektrana*

| Tip elektrane | Veličina (MW) | Troškovi izgradnje (€/kW) |
|---|---|---|
| Nuklearne elektrane | 600-1 000 | 1 500-1 700 |
| Konvencionalne TE – kameni ugljen | 500-600 | 900-1100 |
| Konvencionalne TE – lignit | 300-600 | 900-1200 |
| Konvencionalne TE – plin | 50-100 | 400-450 |
| Kombi-elektrane – plin | 150-500 | 500-750 |
| Hidroelektrane (velike) | 150-500 | 1 500-2 000 |
| Vjetroelektrane (na kopnu) | 15 | 900-1300 |
| Vjetroelektrane (na moru) | 100 | 1 500-2 000 |
| Kombi-elektrane (manje) | 40 | 550-850 |
| Hidroelektrane (male) | 5 | 900-1000 |
| Kogeneracija | 5 | 800-850 |
| Gorivne stanice | 5 | 1 100-1 600 |
| Fotonaponski sustavi | 5 | 6 000-10 000 |

[79] Ta bi konvencionalna termoelektrana od 500 MW ložena ugljenom stajala danas orijentacijski oko 500 milijuna eura; za toliki novac dalo bi se izgraditi naselje s oko 5 tisuća stanova!

Prikazani su jedinični troškovi izgradnje samo onih velikih hidroelektrana koje je prema današnjem stanju stvari ekonomski prihvatljivo graditi; inače troškovi njihove izgradnje znaju biti i daleko viši. Ovise o konkretnim uvjetima na pojedinoj lokaciji i stoga govorimo o tehničkim mogućnostima buduće izgradnje hidroelektrana i o danas ekonomski prihvatljivom dijelu te izgradnje.

Troškovi pogona elektrana dijele se na stalne troškove (neovisne o proizvedenoj električnoj energiji) i troškove ovisne o proizvodnji električne energije. Dakako da se konačna proizvodna cijena dobiva dijeljenjem zbroja stalnih i promjenjivih troškova s isporučenom električnom energijom. U prvi mah se čini prikladnim da stalni troškovi pogona svih elektrana budu što manji; rizik proizvodnje bio bi u tom slučaju malen. To vrijedi za hidroelektrane, vjetroelektrane i sunčane elektrane, kod kojih su ionako promjenjivi troškovi relativno maleni.

Međutim za elektrane koje koriste fosilno, nuklearno ili kakvo nekonvencionalno gorivo, prvenstveno je važno da je udio cijene goriva što manji. Elektrane imaju dugi vijek trajanja (25 do 35 godina) i za tako dug rok nemoguće je pouzdanije predvidjeti kretanja cijena goriva, osim da će svakako rasti. Stoga su elektrane s najmanjim udjelom cijene goriva u ukupnim troškovima pogona najmanje rizične. Makar bile i skuplje prema stalnim troškovima od nekih drugih. U tom pogledu, najbolje stoje nuklearne elektrane (najmanji udio troškova goriva u ukupnim troškovima pogona) a znatno lošije plinsko-turbinske elektrane (visok udio troškova goriva).

Troškovi pogona vezani su dakle uz cijenu goriva (ako elektrana koristi gorivo), uz veličinu investicije i trajanje amortizacijskog razdoblja (kapitalni troškovi), uz komercijalne uvjete izgradnje (troškovi kapitala), uz kvalitetu održavanja te troškove zaposlenih radnika i troškove raznih pogonskih materijala (izvan goriva). Troškove pogona čine i razne naknade koje se plaćaju za korištenje prostorom[80], za korištenje koncesijom, za korištenje vodom[81], za ispuštanje tvari koje opterećuju okoliš[82], komunalna i druge propisane naknade i slično.

U pravilu, elektrane istoga tipa s većim investicijskim troškovima imaju manje pogonske troškove. I obrnuto: jeftinija elektrana u izgradnji – skuplja u pogonu! (Sukladno tome, elektrane će se angažirati u pogonu: one s nižim pogonskim troškovima za temeljnu, stalnu proizvodnju, a one s višim pogonskim troškovima za vršnu, povremenu proizvodnju.[83])

---

[80] Tu naknadu za korištenje prostorom plaćaju jedinicama lokalne samouprave u Hrvatskoj, prema ostvarenoj netoproizvodnji električne energije:
- velike hidroelektrane (po jednoj tarifi) i male hidroelektrane (po drugoj tarifi)
- sve termoelektrane
- vjetroelektrane snage preko 1 MW
- sve geotermalne elektrane

a ne plaćaju je elektrane na ostale obnovljive izvore (sunčane elektrane, elektrane na biomasu, na bioplin, na otpad, na tekuća biogoriva, na deponijski plin i na plin iz postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda, na morske valove, na plimu i oseku...) i dizel-električni agregati.

[81] Tu naknadu plaćaju sve hidroelektrane u Hrvatskoj prema ostvarenoj netoproizvodnji električne energije, a sve druge elektrane prema ostvarenoj potrošnji vode.

[82] Tu naknadu plaćaju sve termoelektrane u Hrvatskoj čija je emisija ugljikova dioksida veća od 30 tona/god, sumporova dioksida veća od 100 kg/god te dušikova dioksida veća od 30 kg/god, a ne plaćaju elektrane na biomasu, biorazgradivi otpad i otpadni mulj.

[83] Opširnije o tome, u poglavlju 9.

Navedimo, opet vrlo orijentacijske proizvodne cijene različitih tipova elektrana, u sadašnje vrijeme, prema različitim izvorima podataka (eurocenta/kWh):

| | |
|---|---|
| – velike hidroelektrane | ≥5 |
| – nuklearne elektrane | ≥4 |
| – konvencionalne TE-ugljen | ≥4 |
| – konvencionalne TE-plin | ≥6 |
| – vjetroelektrane (na kopnu) | 4–9 |
| – vjetroelektrane (na moru) | 5–12 |
| – kombi-elektrane (manje) | 4–6 |
| – hidroelektrane (male) | 2–3 |
| – kogeneracija (mala) | 5–6 |
| – gorivne stanice | 8–10 |
| – fotonaponski sustavi | 75–100 |

Vidljivo je da i proizvodne cijene elektrana variraju u rasponu 1:25 (najjeftinijih nuklearnih, odnosno konvencionalnih termoelektrana loženih ugljenom prema najskupljim fotonaponskim sustavima). To su proizvodne cijene novih elektrana, odnosno predvidive cijene elektrana koje su danas u izgradnji. Proizvodne cijene vrlo starih, potpuno amortiziranih hidroelektrana mogu biti otprilike 1 eurocent/kWh ili nešto više od toga.

Dodajmo i to da je veleprodajna cijena temeljne proizvodnje električne energije na Europskoj energetskoj burzi u Leipzigu (EEX) u doba zgotovljavanja ove knjige (sredinom 2007. godine) bila oko 5 eurocenta/kWh. Pojedine elektroenergetske proizvodne tvrtke najčešće imaju mješavinu pojedinih tipova elektrana i time ostvaruju povoljniji ili manje povoljan položaj na tržištu. Dakako, povremene isporuke ili isporuke vršne energije i pomoćne usluge[84] nude po većim cijenama od cijene temeljne proizvodnje, pa im je i to način ostvarivanja poželjnog prihoda.

[84] Detaljnije o *pomoćnim uslugama* vidjeti u zaključnom dijelu poglavlja 8.

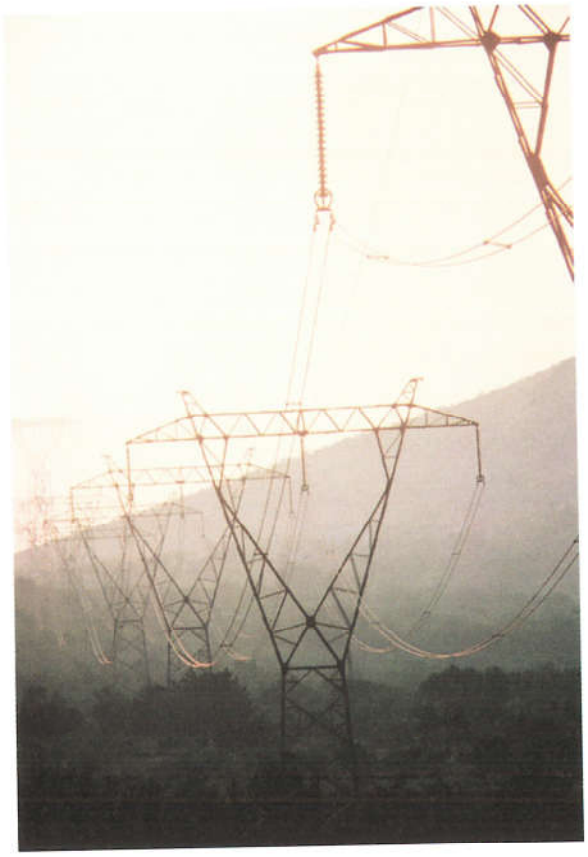
# 7

# Prijenos i distribucija električne energije – mreže

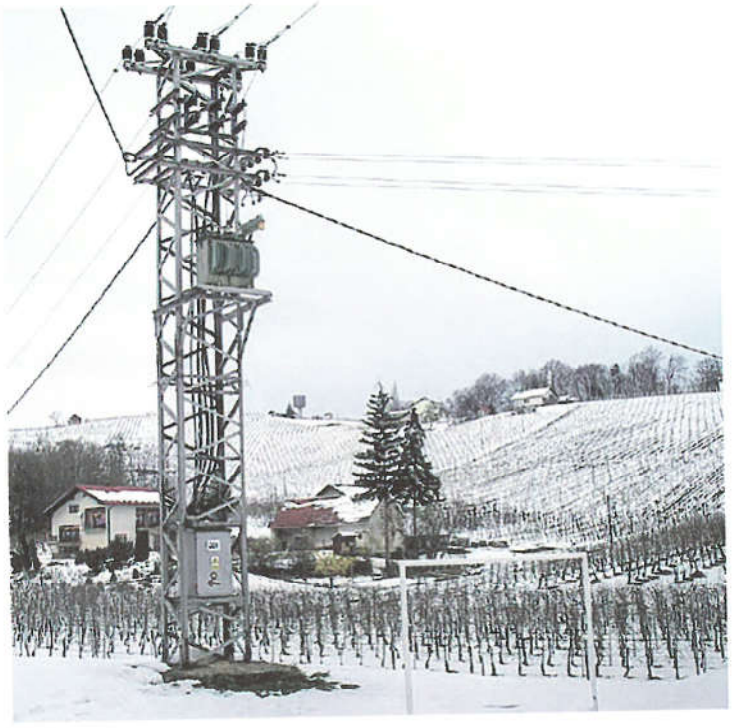
*Prijenos električne energije* je elektroprivredna djelatnost koja (a) omogućuje svakog trenutka kombiniranje proizvodnje električne energije između pojedinih trenutno angažiranih elektrana, na vlastitom području ili iz uvoza, te (b) omogućuje dobavu velikih količina električne energije u glavna čvorišta mreže u skladu s trenutnom potražnjom tih čvorišta, odakle se energija neposredno predaje vrlo velikim kupcima, dalje prenosi radi izvoza ili raspodjeljuje djelatnošću *distribucije električne energije* do pojedinačnih kupaca.

Objekti za prijenos električne energije čine *električnu prijenosnu mrežu*: to su transformatorske stanice (slika 7.1), rasklopna postrojenja te nadzemni (slika 7.2) i kabelski vodovi visokog napona. Prijenosnom mrežom osigurava se usklađena uloga elektrana, tek kooperativnim

*Slika 7.1. Transformatorska stanica* 400/110 kV *Tumbri*



*Slika 7.2. Dalekovod* 400 kV *u Dalmaciji*



*Slika 7.3. Stupna transformatorska stanica* 20/0,4 kV *u Međimurju*

*Slika 7.4. Radovi na seoskoj niskonaponskoj mreži* 0,4 kV

njihovim radom posredovanjem prijenosne električne mreže može nastati konačni proizvod – električna energija, svojstvene cijene, sigurnosti opskrbe i kvalitete.

*Električne distribucijske mreže*, priključene na čvorišta prijenosne mreže, protežu se po manjim predjelima, gradovima, naseljima, ulicama – do objekata za stanovanje, gospodarske, društvene i opće djelatnosti omogućujući isporuku električne energije radi njezina korištenja. Objekti te mreže su transformatorske stanice (slika 7.3), rasklopna postrojenja te nadzemni i kabelski vodovi srednjeg i niskog napona (slika 7.4).

Prijenosne i distribucijske mreže prekrivaju danas cjelokupna područja života civiliziranog čovjeka. U Republici Hrvatskoj je oko 7 250 kilometara prijenosnih vodova i oko 130 000 kilometara distribucijskih vodova (2005).

## Prijenosna mreža i distribucijska mreža

Razgraničenje između prijenosne i distribucijske djelatnosti nije jednoznačno. Po tehničkoj podjeli, prijenosnu mrežu čine postrojenja i vodovi nazivnog napona 110 kV i više, a ostalo je distribucijska mreža. Po funkcionalnoj podjeli, prijenosnu mrežu čine vodovi i postrojenja, čija opterećenja – po veličini i smjeru – prvenstveno ovise o trenutnom angažmanu elektrana i o dobavi iz susjednih mreža a ne o potražnji u pojedinim čvorištima mreže, dok distribucijsku mrežu čine vodovi i postrojenja koji iz tih čvorišta – samo u *jednom* smjeru – razvode energiju do kupaca (potrošača) te je opterećenje distribucijske mreže uvjetovano prvenstveno potražnjom električne energije, a bez obzira na nazivni napon mreže[85].

Konačno, u Europi je česta i vlasnička podjela: ono što je izgradilo distribucijsko poduzeće vlasništvo je tog poduzeća te pripada distribucijskoj mreži, a ono što je izgradilo

[85] Opširnije o prijenosu električne energije i prijenosnim mrežama te o odnosu spram distribucijskih mreža vidjeti u knjizi istog autora „Prijenos električne energije, što je to?", Kigen-Zagreb, 2006.

prijenosno poduzeće vlasništvo je tog poduzeća i pripada prijenosnoj mreži. Razvojne prilike u prošlosti naprosto su tako uvjetovale i to se ne može lako *obrisati*.

Treba reći i sljedeće: ono što je u malo udaljenijoj prošlosti bio napon prijenosa (kod nas, primjerice, 35 kV), to je danas distribucijski napon, jer potražnja nezaustavljivo raste pa u dijelu europskih zemalja današnje mreže napona 110 kV doista imaju pretežno distribucijsku ulogu.

Kombinacija kriterija nazivnog napona (dakle da je prijenosna mreža nazivnog napona 110, 220 i 400 kV) i vlasničkog primjenjuje se i u Hrvatskoj.

Prilike se, u najnovije doba, bitno mijenjaju, iz još jednog razloga. Naime, nezaustavljiva je i snažna tendencija uvođenja tzv. *disperzirane proizvodnje* (naziva se i: *diversificirana, decentralizirana, distribuirana proizvodnja*). Pod kojom se razumijevaju elektrane malih i vrlo malih snaga, često na nekonvencionalne izvore energije, smještene dislocirano u pojedina kućanstva, obrt, male proizvodne pogone ili ustanove, te priključene na distribucijsku mrežu. Pri tome se dimenzioniraju tako da mogućnošću svoje opskrbe mogu namiriti potražnju lokacije na kojoj su instalirane, viškove plasiraju u elektroenergetski sustav, dakle prijenosnu mrežu, koja im – ujedno – služi i kao uvijek raspoloživa rezerva, za slučaj njihova iznenadnog zastoja. Time, distribucijska mreža postaje aktivna mreža, te – u konačnici – iz čvorišta prijenosne mreže preuzima samo razliku između ukupne potražnje i disperzirane proizvodnje na vlastitom području[86].

Takva tendencija naglašena je u zemljama bogatijeg stanovništva; imaju dovoljno sredstava za takve – ipak – skupocjene instalacije, stvarajući kod sebe dojam kako se *sami-brinu-o-sebi*. Doista, kod takvog stanovništva svakako se stvara visoka svijest o razumnijem i štedljivijem korištenju električnom energijom, te spoznaja da električna energija ne dolazi *iz zida* – utičnice, nego da se puno treba potruditi oko njezina stvaranja i dobave. No, i društvo u cjelini treba biti bogato; mora biti spremno da dograđuje donekle podiskorišten elektroenergetski sustav, jer taj sustav uvijek treba moći *uskočiti* – kada bilo koja jedinica disperzirane proizvodnje, neplanirano ili planirano, ali najčešće nenajavljeno, bude u zastoju. Opet, kada su sve disperzirane jedinice spremne za pogon, dio *glavnog* elektroenergetskog sustava bit će neiskorišten.

---

[86] Primjer sela od 750 stanovnika Jühnde kraj Göttingena/Donja Saska, koje postaje prvo *bioenergetsko selo* u Njemačkoj. Cjelokupna energetska opskrba općine utemeljena je na korištenju biomase. Značajno svojstvo biomase, kao kumulirane dozračene Sunčeve energije, je mogućnost uskladištavanja, te korištenje u ritmu potražnje i – time – nepotrebnost bitnije dogradnje konvencionalnog elektroenergetskog sustava.
Biomasa – u obliku stajskog gnojiva i ostataka poljoprivrednog bilja – koristit će se u postrojenju Jühnde putem bioplina kojim se opskrbljuje jedan termoelektrično-toplanski blok, električne snage 500 kW i toplinske snage 480 kW. Tvari u obliku drvnih otpadaka, vode se u jedan toplanski blok, toplinske snage 600 kW. Dodan je i jedan kotao za vršnu proizvodnju topline od 1,6 MW. Pokrivena je, za 220 priključenih kućanstava, ukupna godišnja potražnja električne energije od 2 MWh i toplinske energije od 6,8 MWh po kućanstvu. Dakako, za rezervu – električna mreža povezana je sa sustavom. Toplinska mreža ukupne duljine 5,5 km razvodi toplinu i toplu sanitarnu vodu po cijelom selu.
Godišnje količine ulaznih tvari su: stajsko gnojivo – oko 10 tisuća kubičnih metara, ostaci poljoprivrednog bilja – oko tri tisuće tona, te drvni otpad – oko 1 800 prostornih metara. Ako bi se dovoz organizirao tijekom 200 dana u godini, prosječno će trebati trajno dovoziti 50 kubičnih metara dnevno, dakle oko 10 traktorskih prikolica od po pet *kubika*, poljoprivrednog bilja. K tome još i 15 tona stajskog gnojiva i 9 prostornih metara drva. Svakog od 200 dana u godini! Nije malo, ali nije ni nesvladivo!
Početno je projektiranje otpočelo u jesen 2001. godine, u jesen 2004. godine počeli zemljani građevinski radovi na gradnji postrojenja. U jesen 2005. godine ostvarena je proizvodnja električne energije i topline.
Ukupno će se godišnje proizvoditi četiri milijuna kilovatsati električne i 3,6 milijuna kilovatsati toplinske energije, uz redukciju emisije $CO_2$ za 3 300 tona. Pored pozitivnog globalnog djelovanja, projekt ima i naglašena regionalno prihvatljiva svojstva: zaštita podzemnih i nadzemnih voda, održanje biljne raznolikosti, razvoj samodostatnog gospodarskog kruga i, dakako, ušteda u loživom ulju i prirodnom plinu.
Investicijski volumen cijeloga projekta je oko pet milijuna eura, bez uračunatih poreza i taksa.

# Jedinice prijenosne i distribucijske mreže

Osnovne jedinice prijenosne i distribucijske mreže su:
- rasklopna postrojenja
- vodovi
- transformatori
- jedinice za kompenzaciju jalove snage.

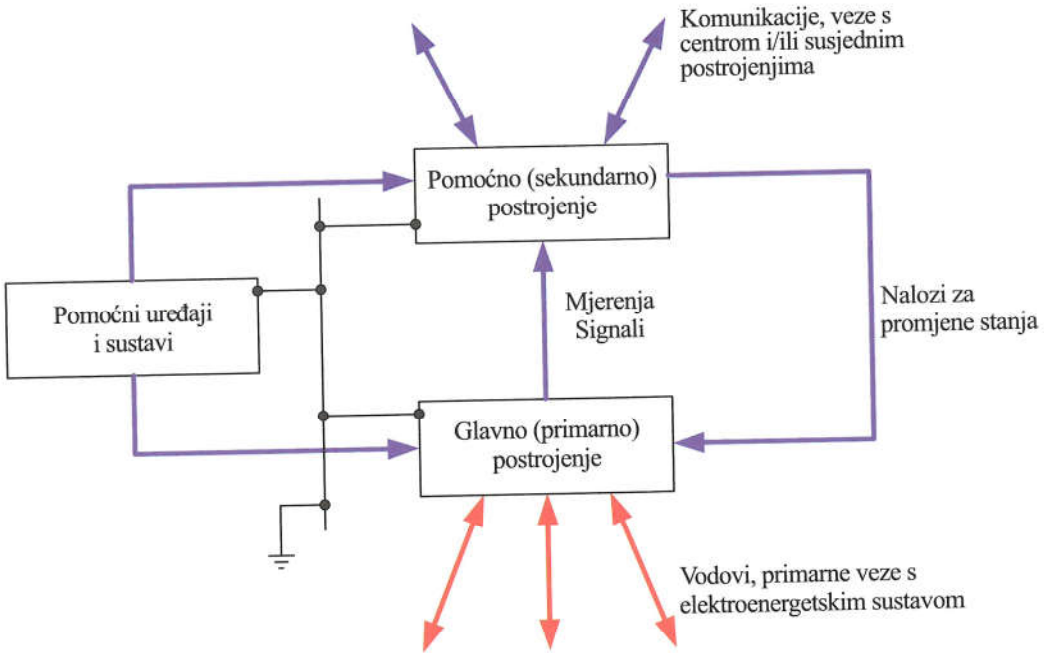
Rasklopno postrojenje služi za povezivanje generatora, vodova i transformatora ili samo nekih između tih jedinica sustava (primjerice: samo vodova) u jedno čvorište mreže, na istoj naponskoj razini (primjerice: rasklopno postrojenje 110 kV, rasklopno postrojenje 20 kV).

Najvažniji dijelovi rasklopnih postrojenja su sabirnice i sklopna polja: sklopna polja omogućuju uključenje pojedinih odvoda (prema generatorima, vodovima, transformatorima) na sabirnice ili njihovo isključenje sa sabirnica. Sabirnice mogu biti jednostruke ili višestruke (najčešće dvostruke). Višestruke sabirnice omogućuju povezivanje u čvorište i grupiranje dijela odvoda na pojedine sabirničke sisteme, a pružaju i povećanu pouzdanost postrojenja (jer jedan sabirnički sistem može ne biti raspoloživ, dok drugi ostaje u pogonu). To je vrlo važno svojstvo, jer u slučaju kvara jednostrukih sabirnica – svi priključeni odvodi, premda ispravni, biti će u zastoju, tako dugo dok se ne otkloni kvar na sabirnicama.

Sklopna polja sadrže – kao bitnu i najvažniju komponentu – *prekidač* kojim se uspostavlja željeno uklopno stanje u pogonu. Na taj prekidač priključena je i električna zaštita koja daje nalog prekidaču za isklop ako je odvod koji je povezan s tim prekidačem u neispravnom stanju. To osigurava pogon preostalog *zdravog* dijela elektroenergetskog sustava, izdvajanjem iz pogona jedinice mreže koja ima neispravnost. To je značajna uloga rasklopnih postrojenja u mreži; pored omogućivanja namjernog sklapanja u mreži (dakle namjernog stavljanja u pogon ili izvan pogona pojedinih jedinica u mreži), rasklopno postrojenje omogućuje i djelovanje električne zaštite koje se djelovanje odvija automatski, bez posredovanja čovjeka, nekoliko dijelova sekunde do nekoliko sekunda nakon nastanka neispravnosti u dijelu mreže.

Prema izvedbi, razlikujemo vanjska i unutrašnja postrojenja (postrojenja na otvorenom ili u zatvorenom prostoru). Vanjska postrojenja najčešće se izvode kao otvorena (u kojima je osnovna izolacija među dijelovima pod naponom okolni zrak, zrakom izolirana postrojenja), a unutrašnja postrojenja mogu biti otvorena, oklopljena (sadrže oklop, ali je izolacija opet okolni zrak) ili zatvorena. Zatvorena postrojenja izvode se tako da su vodiči i svi aparati u postrojenju smještaju u cijevi a između dijelova pod naponom i tih cijevi je plin sumporov heksafluorid pod tlakom ($SF_6$-postrojenja, plinom izolirana postrojenja). Omogućuju bitno smanjenje tlocrta i volumena postrojenja a postrojenja su praktički potpuno otporna na utjecaje iz okoline. Stoga se primjenjuju sve više pri izgradnji visokonaponskih postrojenja u središtima velikih gradova ili u izrazito zagađenu okolišu.

U rasklopnim postrojenjima razlikujemo primarno, osnovno, glavno postrojenje i – s tim primarnim postrojenjem neraskidivo povezano – sekundarno, pomoćno postrojenje, slika 7.5. To sekundarno postrojenje možemo uzimati kao živčani sustav primarnog postrojenja ako ga zamišljamo kao organizam. (Takvo sekundarno postrojenje postoji i u svakoj elektrani.) Sekundarno postrojenje sadrži (pod)sustave za: nadzor stanja (signalizaciju i mjerenje), zaštitu, upravljanje (komandu), regulaciju, automatizaciju, registraciju pogonskih događaja




*Slika 7.5. Rasklopno postrojenje, glavno i pomoćno postrojenje*

i izabranih mjernih vrijednosti, telekomunikacije, te daljinsko vođenje procesa u primarnom postrojenju. Komponente primarnog postrojenja pod nazivnim su primarnim naponom pod kojim je postrojenje u pogonu (dakle, primjerice: 110 kV, 20 kV ili 0,4 kV) a sekundarno postrojenje je pod niskim naponom (220, 110 ili 48 V). Vitalni dijelovi tog postrojenja moraju ostati u funkciji i kada nestane napona u primarnoj mreži, stoga se napajaju izvorima istosmjerne struje, sustavima ispravljača i akumulatora. Manje kritične potrebe, opskrbljuju se izmjeničnom strujom iz kućnog transformatora, a za opskrbu snažnijih a važnih trošila izmjenične struje, koriste se dizel-električni agregati instalirani u postrojenja.

Svojstveno je današnjem pomoćnom postrojenju rasklopnog postrojenja da je svakako omogućeno stanovito daljinsko kontaktiranje s objektom (iz objekta i prema objektu). Od skromnog dojavljivanja događaja grupiranih u pojedine logične cjeline, preko detaljnije dojave pojedinih događaja, sve do omogućivanja daljinskog snimanja cjelokupnog skupa pogonskih događaja s pridruženim trenutkom nastupa, uz milisekundnu ili čak mikrosekundnu točnost i sinkronizirano vrijeme u svim nadziranim objektima. Ostvaruje se prijenos mjernih vrijednosti na daljinu, sve do omogućivanja daljinske registracije energije radi obračuna. Uz nadzorne funkcije (mjerenje, dojava položaja i događaja) normalno je i daljinsko manipuliranje rasklopnim aparatima (daljinsko upravljanje, daljinska komanda)[87] te pomoćnim uređajima. Govorimo o kompleksnom *sustavu daljinskog vođenja*. Karakteristično je da se on smišljeno prožima s lokalnim sustavima automatizacije, regulacije i upravljačkih sekvenci kako bi se viša razina upravljanja osigurala od zagušenja. U distribucijskoj mreži koristi se daljinsko upravljanje, poseban sustav mrežnog tonfrekvencijskog upravljanja u kojem se postojeći energetski vodovi koriste i za utiskivanje i prijenos signala do pojedinih prijemnika u kojima se ti signali izdvajaju tvoreći upravljačke naloge. Naziv je nastao stoga jer se kao signalna izabire tonska frekvencija (stotinjak ili nekoliko stotina herca). Uobičajeno je takvo upravljanje dvotarifnim ili višetarifnim brojilima.

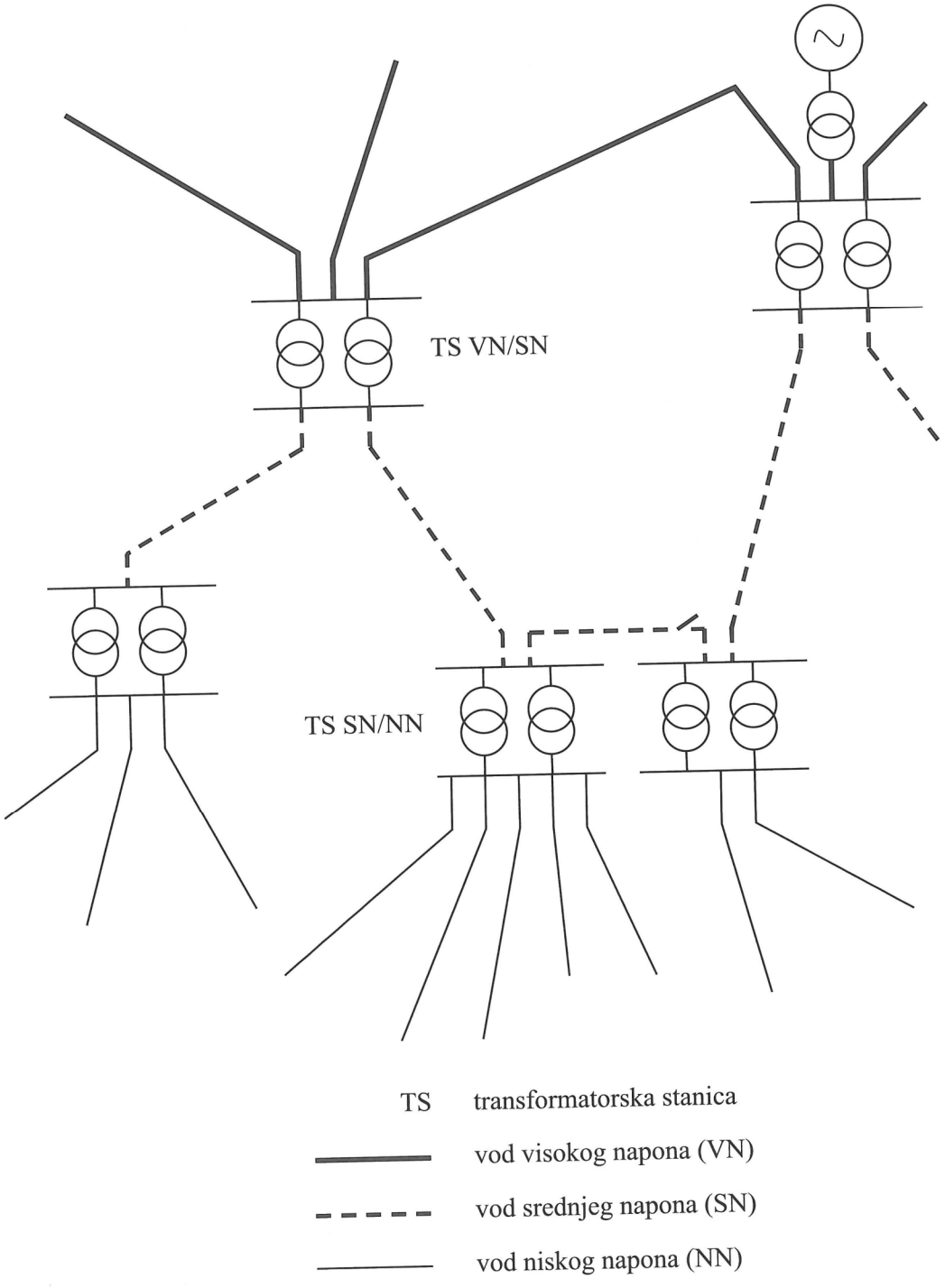
[87] SCADA = supervisory control and data acquisition (engl.)

*Slika 7.6. Transformator* 400/110 kV, 300 MVA *u TS Ernestinovo*

Vodovi mogu biti: nadzemni, kabelski i kombinirani, dakle nadzemno-kabelski vodovi. Visokonaponski vodovi (visokonaponski i srednjonaponski uobičajeno se nazivaju: dalekovodi, kratica DV) izvode se najčešće kao nadzemni vodovi s izuzetkom premošćivanja morskih prepreka ili prodora u urbana središta velikih gradova; tada se koriste kabeli. Visokonaponski nadzemni vodovi izvode se danas uobičajeno kao dvostruki ili višestruki vodovi, pri čemu se na svaki stup vješa dva ili više utrostručenih faznih vodiča (*trojki*) pojedinog voda. Time se štedi na zauzeću prostora vodovima, jer su mogućnosti dobivanja trasa za nove vodove sve teže. Kabelsko rješenje visokonaponskih vodova zna biti i desetak puta skuplje od nadzemnog rješenja za istu prijenosnu moć, pa bi masovna primjena visokonaponskih kabela bila ekonomski nerazumna. Srednjonaponski vodovi izvode se u sve tri nabrojane izvedbe, ovisno o terenskim okolnostima, a niskonaponski vodovi u seoskim i prigradskim područjima kao nadzemni, a u gradskim područjima kao kabelski vodovi. Tendencija je povećanja udjela kabelskih vodova u niskonaponskim i srednjonaponskim mrežama, radi povećanja pouzdanosti i praktično neznatnog vizualnog utjecaja na okoliš.

Transformatorske stanice (kraticom: TS) uobičajeni su objekti u mrežama, sadrže najmanje dva rasklopna postrojenja različitih nazivnih napona između kojih posreduju energetski transformatori prijenosnog omjera kakav određuju nazivni naponi rasklopnih postrojenja koja ti transformatori povezuju. Primjerice, TS 400/110 kV ili TS 20/0,4 kV, ali moguće su transformatorske stanice i s više od dva postrojenja, primjerice TS 400/220/110 kV.

Energetski transformatori (slika 7.6) služe za elektromagnetsko povezivanje dvije mreže različitih nazivnih napona, dakle, u njima se električna energija pri jednom naponu transformira u električnu energiju pri drugom naponu. Položaj transformatora u mrežama visokog, srednjeg i niskog napona prikazan je na slici 7.7. (Takve sheme uobičajeno se crtaju jednopolno, podrazumijeva se da je – u stvarnosti – riječ zapravo o tropolnim shemama, jer je u uobičajenoj primjeni trofazni izmjenični sustav za proizvodnju, prijenos i distribuciju električne energije.)




*Slika 7.7. Visokonaponska, srednjonaponska i niskonaponska mreža*

U mreži, transformatori mogu biti priključeni u uzlaznom smjeru, ako je primarni napon niži od sekundarnog, ili silaznom smjeru, ako je primarni napon viši od sekundarnog. Generatori u većim elektranama najčešće su povezani s elektroenergetskim sustavom uzlaznim transformatorom (koji se naziva blok-transformator, jer povezuje blok elektrane na mrežu), a distribucijske mreže sadrže silazne transformatore, snižavajući distribucijski napon konačno na razinu niskog napona (0,4 kV). Mrežnim transformatorima zovemo transformatore u prijenosnoj mreži koji posreduju između mreža različitih ali visokih na-

pona, gdje smjer toka snage transformatorom nije unaprijed određen; može biti sa strane višeg visokog napona prema nižem visokom naponu ili obrnuto.

Prema promjenjivosti prijenosnog omjera, transformatori se izvode kao: neregulacijski transformatori i to s nepromjenjivim prijenosnim omjerom i s premjestivim prijenosnim omjerom u beznaponskom stanju, te regulacijski transformatori sa (stupnjevitom) regulacijom prijenosnog omjera pod opterećenjem. Regulacija prijenosnog omjera može biti samo u uzdužnom smjeru (kada se djeluje samo na veličinu sekundarnog napona) ili regulacija u uzdužnom i u poprečnom smjeru (kada se djeluje na veličinu i fazni pomak sekundarnog napona).

Jedinice za kompenzaciju jalove snage mogu biti za kompenzaciju induktivne ili kapacitivne potražnje jalove snage. Za kompenzaciju induktivne potražnje koriste se kondenzatorske baterije u kojima se proizvodi, dakle kompenzira jalova snaga koju traže trošila (prvenstveno elektromotori, ali i druga trošila jalove snage) disperzirano u mreži, čime se približavaju mjesta proizvodnje i potražnje jalove snage, bez opterećivanja tom snagom preostalih dijelova mreže. Prigušnice za kompenzaciju kapacitivne jalove snage neopterećenih ili slabo opterećenih vodova u mreži kompenziraju njihovu kapacitivnu potražnju čime djeluju na sniženje pogonskog napona u dijelovima mreže i u razdobljima opterećenja mreže kada bi bez te kompenzacije prevladavala, u tim dijelovima mreže, kapacitivna potražnja.

## Konfiguracija (topologija) mreža

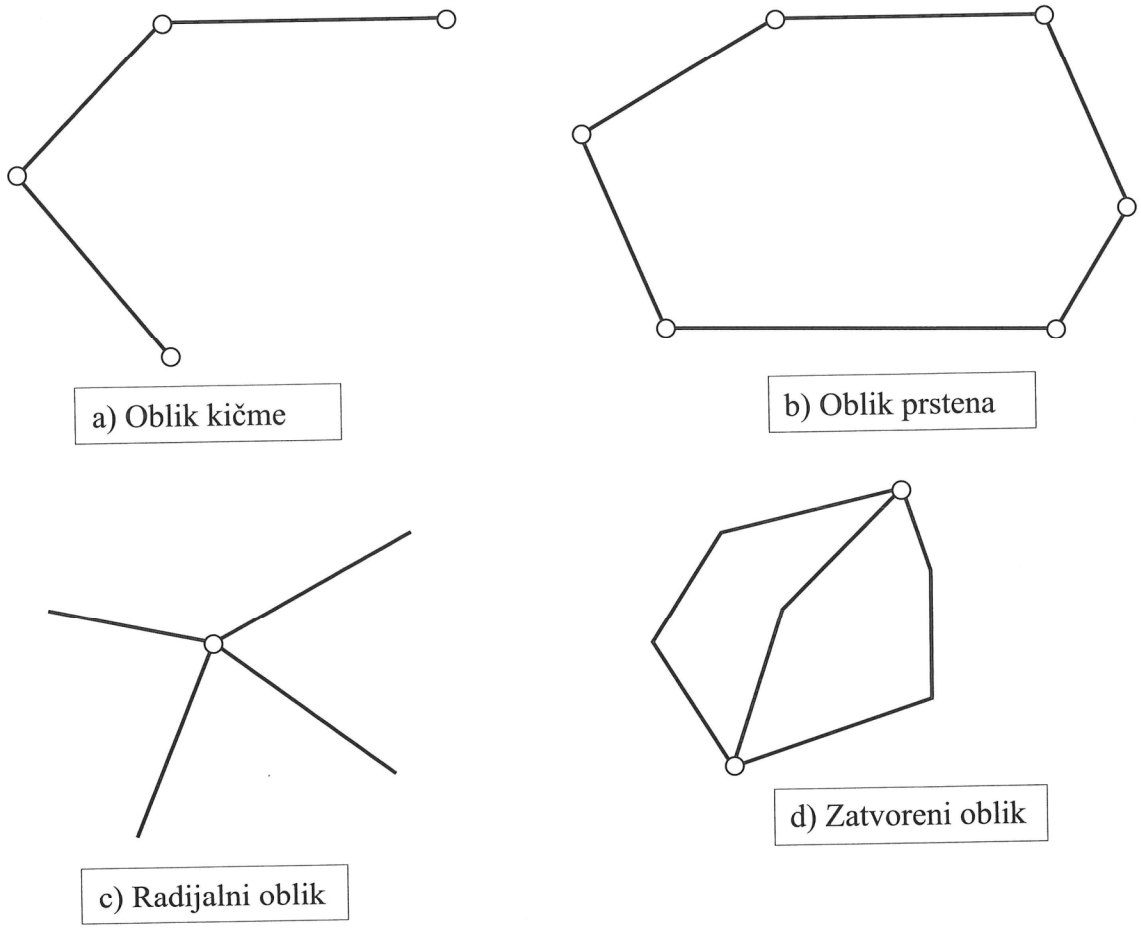
Međusobna prostorna povezanost čvorišta u mreži, dakle rasklopnih postrojenja pomoću vodova, zove se konfiguracija ili topologija mreže, slika 7.8.

Topologiju prijenosnih mreža određuje zatečeno zemljopisno stanje glavnih proizvodnih i potrošačkih čvorišta te njihov potencijalni razvoj. Prijenosna mreža oblikuje se danas, kako bi bila prikladna i sutrašnjim prilikama – skûpa je, pa nisu dopustive nesmotrenosti. Dva su osnovna oblika prijenosne mreže koja se susreću u europskim državama. Prvi je oblik *kičme* (u tom je obliku formirana 400 kilovoltna mreža u Hrvatskoj), koji je prikladan za izdužene državne teritorije (poput hrvatskoga). Drugi je oblik *prstena*, koji više odgovara zaokruženim državnim područjima (poput Francuske ili Njemačke), s donekle ujednačenom zemljopisnom gustoćom proizvodnje i potražnje električne energije. (U konačnici, zajednički gledano, sve su mreže u europskoj interkonekciji prstenaste!)

Mreže srednjeg napona 35 kV, 20 kV i 10 kV i mreže niskog napona 0,4 kV, mogu biti napajane iz jednog čvorišta mreže nadređenog napona ili iz dva ili više čvorišta mreže nadređenog napona.

U slučaju napajanja iz jednog čvorišta, mreža može biti radijalna (zrakasta) i prstenasta. Radijalni vodovi priključeni su samo na početku na napojno čvorište, a mogu biti bez daljnjih odvoda ili mogu sadržavati također radijalna grananja. Prstenasta mreža sadrži vodove čiji je početak i kraj priključen na isto napojno čvorište. Također, mogu biti s radijalnim ograncima ili bez njih.

Mreža napajana iz dva ili više čvorišta nadređene mreže, može biti zatvorena ili zamkasta. U zatvorenoj mreži položeni su vodovi tako da su svojim početkom priključeni na jedno napojno čvorište, a svojim krajem na drugo napojno čvorište. Mogu biti s ogrankom ili bez njega, ali ne postoje međuveze takva dva voda u zatvorenoj mreži. Ako su uspostavljene i poprečne veze između dva ili više takvih vodova, govorimo o zamkastoj mreži.




*Slika 7.8. Neke konfiguracije prijenosnih (a, b) i distribucijskih (c, d) mreža*

Sve opisane konfiguracije mreža odnose se na krajnje mogućnosti međusobnog spajanja vodova i čvorišta. Međutim, u stvarnome pogonu, jednostavno se prelazi iz prstenaste mreže na radijalni pogon, otvaranjem prstena na bilo kojem mjestu, čime se prsten pretvara u dva radijalna poteza. Isto to zamislivo je u bezbroj kombinacija u zatvorenoj ili zamkastoj mreži. Zapravo je radijalno korištenje prstenastih, zatvorenih i zamkastih mreža, dosta uobičajeno u niskonaponskim mrežama jer omogućuje primjenu najjednostavnijih zaštita u tim mrežama i lagano lociranje kvara te brzo prespajanje kada se utvrdi kvar na jednom vodu te mreže.

Pogonsko svojstvo isključivo radijalne mreže jest to da neispravnost na bilo kojem dijelu radijalnog odvoda ili bilo kojem ogranku vodi isključenju zaštitom čitavog tog radijalnog poteza. Dakle, predstavlja trenutni prekid napajanja električnom energijom svih potrošača-kupaca priključenih na taj odvod. U drugoj krajnosti, kod zamkastih mreža i uz zamkasti pogon tih mreža, nakon kvara na jednom vodu u takvoj mreži, zaštita će ga isključiti iz pogona, a sva čvorišta u toj mreži i dalje će ostati pod naponom. Dakle, u idealnom funkcioniranju zamkaste mreže, osobito idealnom funkcioniranju zaštite u toj mreži, jednostruki kvar na bilo kojem od vodova ne bi trebao dovesti do prekida napajanja. Dakako, takva mreža je skupocjena jer sadrži veliku rezervu u primarnoj instalaciji, a i složenu opremu sekundarne instalacije (zaštita).

## Nazivni naponi prijenosne i distribucijske mreže

Ukažimo najprije na potrebno poimanje razlike u pojmovima nazivnog napona i pogonskog napona. Nazivni napon je ime, naziv po kojemu se razlikuju pojedine mreže. Ne znači kako je u svakom trenutku i u svakom čvorištu jedne mreže uspostavljen upravo nazivni napon; moguće je da u nekom čvorištu nije nikad uspostavljen upravo toliki napon. Pogonski napon je napon koji je uspostavljen u nekom čvorištu u stanovitom trenutku promatranja, u drugom trenutku može se uspostaviti viši ili niži napon od toga, ali najčešće barem donekle različit od nazivnog napona. Propisane su granice unutar kojih se mora naći pogonski napon u normalnim prilikama u mrežama pojedinog nazivnog napona, kao i najviši dopušteni napon koji moraju podnositi sve jedinice mreže, ma koliko on trajao. Također, propisane su veličine atmosferskih i sklopnih prenapona, koje oprema konstruirana za određeni nazivni napon mora podnijeti.

Porastom snaga elektrana i/ili porastom potražnje užih urbanih i industrijskih područja, rasle su snage koje je trebalo prenositi prijenosnom mrežom. Moguća prijenosna moć jednog dalekovoda ovisna je o naponu. Vodič, naime, ne može biti nerazumno velike debljine. Primjenjuje se uže do promjera 30–40 milimetara. Time je određena najveća struja koja može teći jednim vodičem. Uzme li se snop od dva, tri ili četiri vodiča u jednoj fazi, može se ta struja udvostručiti, utrostručiti ili učetverostručiti. Za alučelični vodič promjera oko 30 milimetara (oko 490 četvornih milimetara aluminija) trajno dopuštena struja je oko 1 000 ampera[88]. Za dva takva vodiča u snopu, dopuštena struja je, dakle, oko dva kiloampera. Uz napon od 400 kV, omogućen je prijenos od $\sqrt{3} \times 400 \times 2 =$ 1 350 MVA (takvi su naši 400 kilovoltni vodovi). No, to je termička granica opterećenja iznad koje se ne smije ići, jer bi se vodič nedopušteno zagrijavao. Stvarni pogon u redovitim prilikama vodi se uz niže opterećenje od toga, teži se da ono ne bude veće od ekonomski prihvatljivog, da su gubici u tom vodu razumno veliki. To je za taj vod, po prilici, polovina termičke granice opterećenja.

Gubici u vodičima dalekovoda obrnuto su razmjerni kvadratu napona. Naravno, radi li se o prijenosu iste snage, istim vodičima, na istu udaljenost. Primjerice, pri prijenosu snage od 190 MVA, uz napon 110 kV, struja koja teče faznim vodičima jest 190/(1,73 × 110), dakle približno 1 kA odnosno 1 000 A. Ako je riječ o vodu s faznim vodičima kojima je otpor 0,3 oma, gubici u tom vodu su $3 \times 1\,000^2 \times 0{,}3 = 900\,000$ W, dakle 900 kW. Primijenimo li dva puta veći napon, 220 kV, to bi vodilo dva puta manjoj struji, dakle 500 A. Gubici u tom vodu sada bi bili $3 \times 500^2 \times 0{,}3$ = 225 000 W, dakle 225 kW. Udvostručenje napona dovelo bi do četiri puta manjih gubitaka na istom vodu uz prijenos iste snage.

To je temeljni razlog za primjenu sve viših prijenosnih napona, a – ujedno – i povijesni razlog primjene izmjenične struje za prijenos električne energije, jer se izmjenična struja može jednostavno transformirati na poželjno visok napon. I – opet – transformacijom *vratiti* na povoljno nizak napon!

Nova naponska stepenica ne osvaja se lako, tako da se u pravilu posezalo za idućim naponom dva puta većim od prethodnog (niz 110-220-400 kV). Kasnije, kada se nova stepenica *udomaćila*, a iduća pojavila, ustanovljavalo bi se kako bi bilo najbolje da se prethodna *preskočila*: niz 20-110-400 kV, umjesto 10-35-110-220-400 kV. Manje stepenica transformacije – manje ukupnih gubitaka i jednostavnija (jeftinija) struktura mreže.

Nazivni naponi distribucijskih mreža kakvi su uobičajeni u Hrvatskoj su:

- srednji napon: 10, 20 i 35 kV (iznimno 30 kV)
- niski napon: 400/230 V (prva brojka odnosi se na međufazni, linijski napon, a druga na fazni napon).

[88] Pri temperaturi okoline +35 °C i brzini vjetra 0,6 m/s; tada se vodič zagrije na +80 °C.

Tendencija je u distribucijskim mrežama Hrvatske, a i u Europi, prelazak distribucijskih mreža s dva srednja nazivna napona (10 i 35 kV) na jedan-jedini srednji napon (20 kV). Elektroenergetske mreže s manjim brojem naponskih razina (primjerice: 400-110-20-0,4 kV, namjesto 400-220-110-35-10-0,4 kV), dakle, s većim omjerom susjednih nazivnih napona, ekonomičnije su u pogledu troškova izgradnje i pogonskih troškova, radi manjeg broja rasklopnih postrojenja i transformatora, te manjih gubitaka transformacije. U prijenosnim mrežama zaustavlja se dalji razvoj na naponskoj razini 220 kV. U distribucijskim mrežama to ne ide lako: u većim i velikim gradovima položeni su brojni kilometri kabela 10 kV, koji se dakako ne mogu koristiti pod naponom 20 kV, njihova zamjena mnogo bi koštala, a nije im istekao vijek trajanja. Kabeli 35 kV, ukoliko bi prešli na korištenje pod naponom 20 kV, smanjili bi prijenosnu moć na 20/35, što je malene polovina, pa takav postupak nije razuman. Treba naći kompromis između ekonomskog gubitka koji time nastaje i dobitka koji se ostvaruje uvođenjem nove koncepcije mreže. Izgleda kako je kompromisno rješenje prelazak na mreže 110-20-0,4 kV u seoskim i prigradskim područjima gdje su zatečeni pretežno nadzemni vodovi 10 i 35 kV koji se mogu preinačiti na nazivni napon 20 kV. Gradskim područjima primjerenije su naponske razine 110-10-0,4 kV, jer uvažavaju zatečen velik udio kabela 10 kV u takvim mrežama. Primjena transformacije 110/20 kV ili 110/10 kV, naziva se izravna, direktna transformacija jer omogućuje izravni spoj čvorišta prijenosne mreže s čvorištem distribucijske mreže putem te transformacije.

Svakako da primjena izravne transformacije 110/20 kV i daljnje transformacije – radi krajnjeg korištenja – 20/0,4 kV predstavlja jednostavniju i jeftiniju strukturu mreže, sa smanjenim gubicima, od mreže u kojoj su stupnjevi transformacija 110/35-35/10-10/0,4 kV. Ako bismo raspolagali *livadom* na kojoj treba uspostaviti elektroenergetsko napajanje, bez daljnjeg bismo išli na prvo rješenje. Međutim, ne raspolažemo praznom pločom nego zatečenim stanjem, pa treba oprezno razmotriti koliko investicijskog troška za nove objekte treba uložiti i kolika je preostala vrijednost zatečenih objekata koje bi valjalo napustiti da se prijeđe na novi sustav. Prelazak na 20 kV distribucijsku mrežu trajat će desetljećima ili uopće do njega neće ni doći na nekim područjima, barem u siromašnijim zemljama.

*Tablica 7.1. Naponske razine i kratice njihovih naziva*

| Naponska razina | Hrv. | Engl. | Njem. | Franc. | Područje napona |
|---|---|---|---|---|---|
| Niski napon | NN | LV | NS | BT | Manje ili jednako 1 kV. |
| Srednji napon | SN | MV | MS | MT | Više od 1 kV, a manje ili jednako 50(60) kV. |
| Visoki napon | VN | HV | HS | HT | Više od 50(60) kV, a manje ili jednako 150 kV. |
| Vrlo visoki napon | | VHV | HöS | THT | Više od 150 kV, a manje ili jednako 500 kV. |
| Ekstra visoki napon | EVN | EHV | EHS | EHT | Više od 500 kV, a manje od 1 000 kV. |
| Ultra visoki napon | UVN | UHV | UHS | UHT | Jednako ili više od 1 000 kV. |

Uobičajen sadašnji nazivi naponskih razina mreža, onako kako ih zove elektrotehnička praksa te kratice tih naziva, kakve se primjenjuju na hrvatskom, engleskom, njemačkom i francuskom jeziku, navedeni su u tablici 7.1. Značenja tih kratica, primjerice za *visoki napon* su: HV = high voltage (engl.), HS = Hochspannung (njem.) i HT = haute tension (franc.) te za *vrlo visoki napon*: VHV = very high voltage (engl.), HöS = Höchstespannung (njem.) i THT = très haute tension (franc.).

## Energetske karakteristike vodova i transformatora

Vodovima i transformatorima u mrežama svojstveni su gubici snage i gubici energije; gubici energije u razdoblju dok su gubici snage trajali. Kod vodova najznačajniji je gubitak nastao zagrijavanjem vodiča protokom struje kroz njih.

Ostali gubici (gubitak odvoda – zbog nesavršene izolacije, gubitak zbog pojave korone – električna izbijanja u zraku u bliskoj okolini vodiča), na nižim naponima praktički su zanemarivi a na vrlo visokim (u pravilu: 400 i 220 kV) su iskazivi. Korona se javlja uz oplošje vodiča, kada je električno polje na tim mjestima jače od električne čvrstoće zraka (oko 30 kV/cm, u normalnim okolnostima) te dolazi do snažne ionizacije i lokalnih proboja zraka, ali samo u neposrednoj blizini vodiča jer je tu električno polje najjače. Ovisi o naponu, o promjeru vodiča (što je promjer manji uvjeti za koronu su izraženiji), stanju površine vodiča i meteorološkim uvjetima. Javlja se karakteristično pucketanje i plavičasto svjetlucanje koje se vidi noću.

Ovdje ćemo se osvrnuti samo za pretežne gubitke u vodovima izazvane, neraskidivo, pojavom Jouleove topline ako vodičem teče struja. Kako je Jouleova toplina razmjerna otporu vodiča i kvadratu struje koja kroz njega teče, tako su gubici na vodu kvadratno ovisni o struji, odnosno o opterećenju (prividnoj snazi, odnosno djelatnoj snazi podijeljenoj s faktorom djelatne snage), vidjeti sliku 10.2. Ti se gubici mijenjaju s otporom, a otpor se mijenja s temperaturom vodiča. Temperatura vodiča ovisna je o temperaturi okoline (kod nas, između –25 °C i +40 °C) i o gubicima u vodičima, jer se mora uspostaviti nadtemperatura kako bi se odvijalo odvođenje topline u okolinu. Dopuštena temperatura vodiča je +80 °C, stoga se otpor aluminijskih i bakrenih vodiča mijenja u granicama ±25 posto oko neke srednje vrijednosti[89]. Time su gubici manji pri niskim temperaturama okoline a veći pri višim, ali tijekom godine se to praktički ujednači.

Gubici u transformatoru ovisni su i o naponu i o struji. Međutim, kad je transformator pod pogonskim naponom, praktički uz relativno mala odstupanja od nazivne vrijednosti, tada su gubici ovisni o naponu konstantni i nazivaju se gubicima praznog hoda, vidjeti sliku 10.3. Jer čim je transformator priključen na napon, odmah se javljaju ti gubici u punoj vrijednosti. Ti se gubici još nazivaju i gubicima u željezu, jer se oni ostvaruju zagrijavanjem željezne jezgre transformatora, zbog njezina premagnetiziranja (pri frekvenciji 50 Hz, 50 puta u jednoj sekundi magnetizira se jezgra u jednom smjeru, a 50 puta u suprotnom smjeru) i zbog induciranih vrtložnih struja u jezgri.

Opteretimo li transformator, vodičima njegovih namota poteku struje i one izazivaju zagrijavanje tih vodiča – po Jouleovu zakonu, u ovisnosti o kvadratu struje koja njime teče. Ti gubici nazivaju se gubici zbog opterećenja transformatora ili gubici u bakru,

[89] Vidjeti o tome u poglavlju 2, komentar relacije (2.9).

jer se namoti transformatora izvode u pravilu iz bakrenih vodiča. Dakle karakteristika gubitaka u transformatoru imat će početnu vrijednost (gubici praznog hoda) i nakon toga dodavat će se gubici zbog opterećenja, kvadratno ovisni o tom opterećenju.

## Prenaponi u mrežama

Sve komponente električnih mreža izložene su stalnom djelovanju pogonskog napona, najviše jednakom dopuštenom najvišem naponu u normalnim ili poremećenim prilikama. Takav napon uzrokuje normalno toplinsko naprezanje izolacije, jer se u izolaciji pod djelovanjem izmjeničnog električnog napona javljaju dielektrični gubici koji griju izolaciju i tijekom dugotrajnog izlaganja postupno je degradiraju. Konačni rezultat takve degradacije je proboj izolacije i završetak vijeka trajanja komponente u kojoj se on zbio. To se u prosjeku događa nakon više desetaka godina pogona.

Povremeno je izolacija svih komponenata mreže izložena povišenim naponima. Ta povišenja napona mogu biti pogonske frekvencije javne električne mreže (u Europi: 50 Hz), tada se zovu privremeni prenaponi. Oni mogu biti posljedica naglo poremećene konfiguracije mreže i traju dotle dok se ta konfiguracija ne konsolidira. Znatno viši povremeni prenaponi i drugačijeg valnog oblika su sklopni prenaponi i atmosferski prenaponi. Svim nabrojanim povremenim prenaponima izložena je izolacija komponenata mreže i ona može otkazati pod djelovanjem tih prenapona, iznenada i prije isteka vijeka trajanja pojedine komponente. Sklopni prenaponi nastaju prilikom svake manipulacije, dakle, uklopa ili isklopa, pojedinih jedinica mreže i tim prenaponima izloženi su i sklopni elementi rasklopnih aparata prilikom sklapanja. Atmosferski prenaponi posljedica su atmosferskih električnih pražnjenja, udara munje u/ili u blizini jedinica mreže. Znaju imati vrlo visoke vrijednosti, dosežu i nekoliko stotina kilovolta, te malo trajanje, reda veličine nekoliko desetaka mikrosekunda.

Mjere za osiguranje povoljne sigurnosti jedinica mreže prema naponu su:

- regulacija generatora i transformatora te opterećenje prigušnicama u pojedinim čvorištima mreže – što drži pogonski napon trajno u propisanim granicama,
- zaštita odvodnicima prenapona – koja štiti naponski osjetljivije komponente mreže od sklopnih i atmosferskih prenapona,
- neposredno ili posredno uzemljenje zvjezdišta – koje dovodi do toga da svi prenaponi imaju kontroliranu vrijednost prema zemlji,
- gromobranska zaštita – koja štiti nadzemne vodove i postrojenja od izravnog udara munje u fazne vodiče.

Sve komponente mreže dimenzioniraju se dovoljno otporno prema pogonskom naponu i očekivanim prenaponima u mreži. Pogonski napon je u normalnim pogonskim prilikama oko nazivnog napona mreže, u stanovitim granicama. Najviši napon mreže je propisima ograničen za mreže pojedinih nazivnih napona. Odnosi se na bilo koje mjesto u mreži i u bilo koje vrijeme, a ne odnosi se na prolazna, povremena prekoračenja zbog kvarova, sklapanja i atmosferskih pražnjenja. Sva oprema ugrađena u mrežu mora trajno podnositi taj najviši napon mreže u koju je ugrađena, te se često deklarira i kao nazivni napon te opreme, tablica 7.2.

*Tablica 7.2. Nazivni srednji i visoki naponi te najviši i podnosivi naponi* (kV)

| Nazivni napon mreže | Najviši napon u mreži | Podnosivi 1-minutni napon | Podnosivi atmosferski udarni napon | Podnosivi sklopni udarni napon |
|---|---|---|---|---|
| 10 | 12 | 28 | 60 | - |
| | | | 75 | - |
| 20 | 24 | 50 | 95 | - |
| | | | 125 | - |
| 35 | 38 | 70 | 145 | - |
| | | | 170 | - |
| 110 | 123 | 185 | 450 | - |
| | | 230 | 550 | - |
| 220 | 245 | 395 | 950 | - |
| | | 460 | 1 050 | - |
| 400 | 420 | 630 | 1 300 | 950 |
| | | 680 | 1 425 | 1 050 |

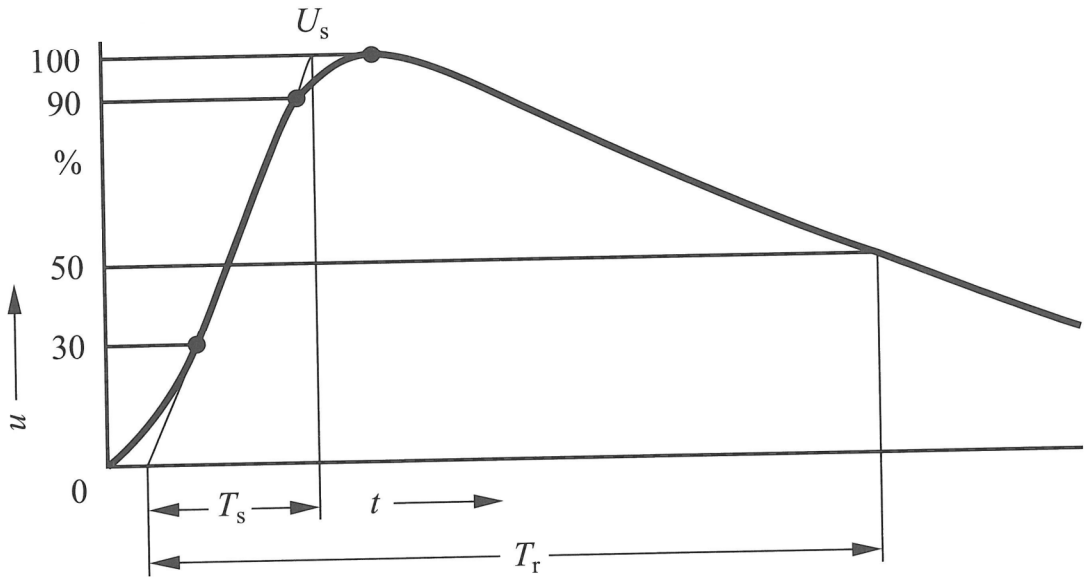
Sva oprema mora podnijeti i kratkotrajni podnosivi izmjenični napon, koji se najčešće naziva podnosivi 1-minutni napon. To je izmjenični napon frekvencije 50 Hz, kojeg izolacija svake komponente mora podnijeti u trajanju od jedne minute. Prema njemu, sva visokonaponska oprema izrađuje se s normalnom i pojačanom otpornošću.

Komponente svih nazivnih napona ispitivanjem se podvrgavaju podnosivom atmosferskom udarnom naponu. To je udarni napon faza-zemlja i faza-faza, valnog oblika 1,2/50 mikrosekunda, kojeg komponenta mora podnijeti bez preskoka ili proboja. Prema njemu, za sve nazivne napone izrađuje se oprema s normalnom i pojačanom izolacijskom otpornošću. Ako je smještajno izložena više atmosferskim električnim udarima (nadzemni vodovi, vanjska postrojenja), uzet će se oprema veće izolacijske otpornosti, a ako je manje tome izložena (kabelski vodovi, unutrašnja postrojenja) uzet će se oprema niže izolacijske otpornosti.

Podnosivom sklopnom udarnom naponu podvrgava se izolacija komponenata samo najviših nazivnih napona (400 kilovolta i više). To je udarni napon faza-zemlja i faza-faza, valnog oblika 250/2 500 mikrosekunda, kojeg komponenta mora podnijeti bez preskoka ili proboja.

Udarni naponi iskazuju se amplitudnom vrijednošću, a njihovo trajanje, kao omjer trajanja čela i trajanja do smanjenja njihove vrijednosti na 50 posto amplitudne vrijednosti (primjerice: 1,2/50 mikrosekunda znači trajanje čela od 1,2 mikrosekunde i trajanje hrpta od 50 mikrosekunda). Nazivi tim trajanjima dati su stoga što vremenski oblik krivulje udarnog napona podsjeća na *čelo* i *hrbat* profila bizona, slika 7.9. Udarni sklopni prenapon iskazuje se ponekad, umjesto apsolutnom vrijednošću, faktorom prenapona, relativnim brojem. Faktor prenapona je omjer amplitudne vrijednosti sklopnog prenapona i tjemene vrijednosti najvišeg faznog napona mreže. Nazivni napon mreže, najviši napon mreže i podnosivi 1-minutni napon, iskazuju se efektivnim linijskim vrijednostima.

Ukažimo ovdje na jednu značajnu pojedinost. Dok se uz frekvenciju 50 Hz, napon u mrežama sinusno mijenja tako da je trajanje jedne periode 20 milisekunda, dotle je trajanje atmosferskih prenapona reda veličine 50 mikrosekunda, a sklopnih prenapona 2 500 mikrosekunda. Dakle 8 do 400 puta kraće od trajanja jedne 50-hercne periode! Prenapon traje *znatno kraće* od trajanja jedne-jedine periode!




*Slika 7.9. Udarni naponski val*
*$U_s$ = amplitudna vrijednost, $T_s$ = trajanje čela, $T_r$ = trajanje hrpta*

Najmanji dopušteni zračni razmak faza-faza i faza-zemlja u postrojenjima za pojedine nazivne napone određen je tako da sigurno ne dođe do preskoka u zraku. Primjerice, za nazivni napon mreže od 10 kilovolta jednak je 120 milimetara, a za mreže 20 kilovolta on je jednak 220 milimetara. Za niskonaponska postrojenja, najmanji dopušteni razmak faza-faza je 10 milimetara, a faza-zemlja 15 milimetara.

## Kratki spoj u mrežama

Nalazi li se prijenosna ili distribucijska mreža u potpuno raspoloživu stanju, to prvenstveno znači da su sva tri fazna vodiča duž čitave mreže u galvanski neprekinutom stanju, te da je izolacija između faza i između svake faze i zemlje u ispravnom stanju. U takvoj mreži mogu se uspostavljati normalni pogonski naponi, a vodičima u toj mreži mogu teći normalne pogonske struje. Dopustiva neispravnost izolacije (primjerice, probijen jedan članak u izolatorskom lancu koji sadrži više takvih članaka) omogućuje pogon, mreža se smatra raspoloživom, sve dok taj početni nedostatak ne prijeđe u neispravnost koja dovodi do kratkog spoja faznog vodiča i zemlje i/ili do kratkog spoja između faznih vodiča.

Kratki spojevi u mrežama mogu nastupiti razlozima iz okoline, tehničkim razlozima i razlozima koje stvaraju ljudi svojim nepromišljenim aktivnostima:

- proboj izolacije bilo kojeg aparata u rasklopnim postrojenjima ili transformatorima,
- proboj izolacije nadzemnog voda ili kabela zbog greške u materijalu, zagađenja izolacije ili isteka vijeka trajanja izolacije,
- prekida izolatorskog lanca ili pucanja izolatora uz pad faznog vodiča na konzolu stupa,
- prekida vodiča i njegova pada na tlo ili kakav drugi uzemljeni objekt,
- jakog vjetra koji otklanja vodiče nadzemnog voda približavajući ih na nedopuštenu međusobnu udaljenost ili prema uzemljenim objektima,
- orošavanja izolacijske površine izolatora nadzemnih vodova,

- smanjenja sigurnosne visine iznad tla ili drugih objekata pri vrlo visokim temperaturama okoline i/ili velikim strujnim opterećenjima vodiča nadzemnih vodova,
- premoštenja izolatora ili zračnog izolacijskog razmaka pticama ili drugim životinjama,
- približavanjem grana drveća faznim vodičima na udaljenost manju od preskočne udaljenosti,
- ionizacijom zraka pri požarima ispod trasa nadzemnih dalekovoda,
- djelovanjem potresa ili klizanja tla u blizini dalekovodnih trasa,
- nesmotrenim uklopom na uzemljeno stanje ili nesmotrenim pokušajem uzemljivanja dijelova pod naponom,
- nesmotrenim dodirom ili približavanjem faznim vodičima,
- kranovima, vozilima, bagerima i sl. iznad tla na nadzemnim vodovima,
- zemljanim radovima u trasi kabelskih vodova,
- premošćenjem vodiča vodljivim letećim predmetima (vrpcama zmajeva, balona i sl.) ili kidanjem vodiča letjelicama.

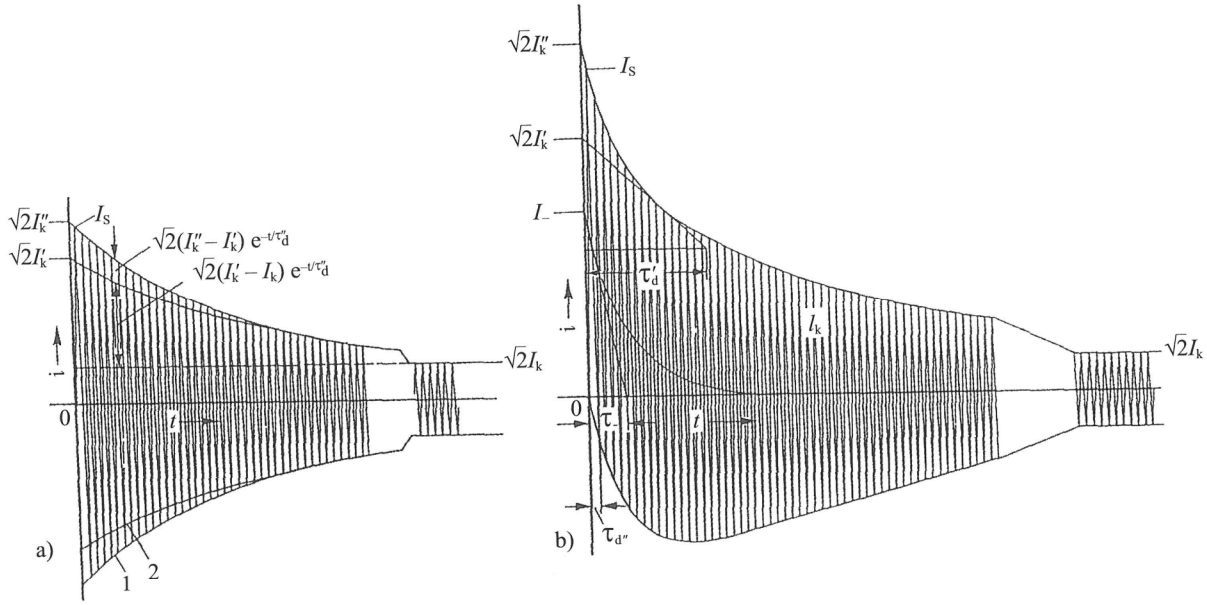
Kratki spojevi predstavljaju najčešći uzrok zbog kojega dolazi do prisilnih, dakle neplaniranih, iznenadnih, zastoja jedinica mreže.

Prema statistici pogonskih događaja u prijenosnoj mreži Hrvatske elektroprivrede, kratki spojevi su izrazito najčešća greška koja je izazvala prisilne zastoje u toj mreži, čak dvije trećine svih prisilnih zastoja uzrokovano je kratkim spojevima. Prema udjelu vrste kratkog spoja, najčešći je jednopolni kratki spoj koji predstavlja preko polovine svih kratkih spojeva koji su bili uzrokom prisilnih zastoja.

Jednopolni kratki spoj može nastupiti, dakako, samo u mreži s uzemljenom nultočkom, jer tada svaki kratki spoj faznog vodiča i zemlje zatvara, putem uzemljene nultočke, strujni put struji kratkog spoja. U mrežama s izoliranom nultočkom (u Hrvatskoj: neke srednjonaponske mreže) jednokratni spoj sa zemljom ne predstavlja jednopolni kratki spoj, nego stanje koje zovemo zemljospoj. Fazni napon *bolesne* faze padne na nulu, a fazni napon *zdravih* faza poraste na linijsku vrijednost. To povećava šansu da se na jednoj od tih faza dogodi novi zemljospoj, kada je ukupno nastalo stanje u mreži, zapravo, dvopolni kratki spoj preko zemlje.

Manifestacija kratkih spojeva u mreži su struje kratkog spoja, mnogostruko veće od normalnih pogonskih struja. Razlog tome je taj što su impedancije generatora, transformatora i vodova u mreži mnogostruko manje od impedancija trošila u mreži. Pri kratkom spoju, trošila se premošćuju i time se pogonskom naponu izlažu samo impedancije mreže. Rezultat je struja kratkog spoja, koja znade biti više desetaka puta veća od normalne pogonske struje. To je elementarna osnova za funkcioniranje zaštite u mreži, koja zaštita dopušta normalnu pogonsku struju pojedinim jedinicama mreže, a kod njezina prekoračenja daje nalog za isklop odgovarajuće jedinice mreže. Nakon toga, strujna opterećenja u mreži ponovno se konsolidiraju; u najboljem slučaju – potpuno, a u lošijem slučaju – uz eventualno preopterećenje nekih jedinica mreže i, time, eventualno novog djelovanja zaštite. Djelovanje zaštite u mrežama je takvo da kratki spojevi traju nekoliko desetaka milisekunda do nekoliko sekunda od pojave kratkog spoja u mreži.

Tipično, struja kratkog spoja u mreži nema stalnu vrijednost, slika 7.10. Ona je dakako, izmjenična, ali sa silaznim vrijednostima amplituda, pa čak i otklona amplituda od vremenske osi (s istosmjernom komponentom te struje), tijekom vremena od nastupa kratkog spoja.




*Slika 7.10. Struja kratkog spoja u mreži*
*(a) bez istosmjerne komponente struje*
*(b) s istosmjernom komponentom struje*
$I_k$ = *trajna struja kratkog spoja*

U prvom trenutku, struja kratkog spoja je najveća, tu vrijednost zovemo udarnom strujom kratkog spoja (dinamička struja kratkog spoja). Ona izaziva najveće mehaničko opterećenje dijelova mreže kojima teče, jer se javljaju odbojne i privlačne sile među tim dijelovima, to veće, što je struja koja njima teče, veća. Dakle, u početnom trenutku kratkog spoja, može doći do plastične deformacije ili čak kidanja dijelova kojima teče struja kratkog spoja. Stoga, sve komponente mreže moraju biti mehanički otporne na ta naprezanja izazvana očekivanom dinamičkom strujom kratkog spoja.

U kasnijim trenucima struja kratkog spoja donekle opadne, do trenutka isklopa te struje, djelovanjem zaštite na prekidač. Struja u tom trenutku naziva se rasklopna struja kratkog spoja. Ako ne bi došlo do isklopa, struja bi još nešto opala i smirila se oko neke stalne vrijednosti, još uvijek mnogostruko veće od normalne pogonske struje, koju nazivamo trajnom strujom kratkog spoja.

Toplinsko djelovanje struje kratkog spoja, na sve dijelove mreže kojima ona teče, ostvaruje se u razdoblju od nastanka kratkog spoja do njegova isklopa, dakle, do prekidanja struje kratkog spoja. Efektivna vrijednost te struje naziva se termička struja kratkog spoja. Pod djelovanjem termičke struje kratkog spoja razvija se toplina koja podiže temperaturu svih dijelova kojima teče ta struja, znatno više od povećanja temperature koje izaziva normalna pogonska struja. Sve komponente mreže moraju podnijeti to kratkotrajno povećanje temperature, bez plastičnih deformacija.

Promjena struje kratkog spoja to je veća što je mjesto kratkog spoja bliže generatorima, elektranama u mreži. Također, na vremenski tijek promjene struje kratkog spoja utječe i trenutak u kojem je nastupio kratki spoj. Najveća udarna struja kratkog spoja slijedit će ako je kratki spoj nastupio u trenutku kada je trenutna vrijednost pogonskog izmjeničnog napona bila jednaka nuli. Što kratki spoj nastupi *dublje* u mreži, dakle, mjesto kratkog spoja je elek-

trički udaljenije od generatora, to je promjena struje kratkog spoja slabije izražena. Takav je slučaj u distribucijskoj mreži na koju nije priključena nijedna elektrana.

Razvojem elektroenergetskog sustava na nekoj teritoriji, rastu struje kratkih spojeva u mreži. Neprestano se povećava broj i snaga generatora u mreži i smanjuje ukupna impedancija do čvorišta mreže, povećanjem broja vodova do tih čvorišta (primjerice: impedancija dva paralelna, a jednaka voda, između dva čvorišta, jednaka je polovini impedancije jednog takvog voda između ta dva čvorišta, isto je tako i s impedancijama dva paralelna transformatora ili generatora). U sadašnjim velikim prijenosnim europskim mrežama, rasklopna struja u njihovim čvorištima zna biti 40 ili čak 63 kiloampera (40 000-63 000 ampera!). Postupni porast struje kratkog spoja u mrežama vodi tome da se sklopni aparati, ali i ostale komponente mreže, moraju tome prilagođavati: zamjenom – inače još uvijek ispravnih – aparata nedovoljne čvrstoće prema kratkome spoju, aparatima dovoljne čvrstoće.

## Ostala naprezanja jedinica mreže

Osim naprezanjem naponima i strujama, jedinice mreže izložene su i naprezanju ostalim uzrocima. Stalni uzroci naprezanju su toplina iz okoline koja podiže ili snižava temperaturu vodiča i izolacije i time ostavlja manju ili veću mogućnost strujnog toplinskog naprezanja vodiča. Također, stalni uzroci mehaničkom naprezanju su sile težine svih komponenata mreže i sile zatezanja vodiča nadzemnih vodova i u rasklopnim postrojenjima. Povremeni ostali uzroci naprezanjima su vjetar, snijeg, led te seizmičko djelovanje.

Osobito može biti opasno dodatno opterećenje vodiča nadzemnih vodova i vanjskih rasklopnih postrojenja, stvaranjem ledenog omotača na njima i istodobnim bočnim djelovanjem snažnog vjetra okomitog na os vodiča. U tom pogledu, komponente mreže dimenzioniraju se sukladno propisima koji određuju najveće očekivane debljine zaleđivanja i najveće očekivane brzine vjetra, na pojedinim topografskim područjima državnog teritorija. Ako se ipak dogodi veće zaleđivanje ili jači vjetar od tih, propisima određenih, dolazi do većeg mehaničkog naprezanja komponenata od propisima očekivanog i – eventualno – do kidanja vodiča nadzemnih vodova ili u vanjskim rasklopnim postrojenjima, pa čak i do rušenja stupova duž više kilometara zahvaćenih dijelova trase vodova. Sanacija tako nastalih oštećenja, koja se javljaju rijetko i na ograničenim područjima, ipak košta manje novaca nego li ulaganje u mrežu koja bi imala stopostotnu sigurnost i prema takvim izvanrednim okolnostima.

## Neke osobitosti prijenosnih mreža

Prijenos se električne energije u prstenastoj električnoj mreži ne dade usmjeriti na način da se odvija samo najkraćim ili bilo kakvim drugim a eventualno poželjnim putem. Prijenos se prirodno ravna po svojstvenim Kirchhoffovim zakonima koji se nikako ne daju izbjeći. Osim iznimno, doista posebnim mjerama koje se svode na ugradnju osobitih uređaja kakvih redovito nema u mreži, ali i tada se prijenos ravna po istim zakonima, samo ne tako evidentno iskazivim. Dakle, ako se prijenos od primjerice 100 MW želi ostvariti između čvorišta A i B, koja su međusobno povezana izravnim vodom A–B, ali i neizravno putem nekih

drugih vodova, primjerice i vodovima A–C–D–B i A–E–B, neće se sav prijenos ostvariti samo vodom A–B, nego dijelom i svim drugim spomenutim vodovima. Dobar dio te snage *razlijeva* se po pokrajnjim vodovima mreže (to ovisi o impedancijama tih vodova i impedanciji voda A–B, te o povlačenju snaga u čvorištima C, D i E). Dodaje li se tome i potreban prijenos jalove snage, stvarne prilike postaju još složenije. Izvoz električne energije iz Austrije u Njemačku odvijat će se, kako spojnim vodovima između te dvije susjedne zemlje – tako i mrežama Slovenije, Italije, Švicarske, Francuske, Mađarske, Slovačke i Češke, na primjer, usprkos našoj eventualnoj drugačijoj želji.

Prijenos dalekovodom je ograničen još jednom karakteristikom: stabilnošću prijenosa, pored ograničenja zagrijavanjem vodiča. Uz određeni napon mreže ne može se vodom prenijeti veća snaga od one koja proizlazi iz omjera kvadrata tog napona i reaktancije, je razmjerna duljini voda.

Relacija koja povezuje te veličine, a presudna je za razumijevanje električnog prijenosa snage je

$$P_{12} = (U_1 \cdot U_2/X) \cdot \sin \delta \qquad (7.1)$$

gdje su $P_{12}$ = djelatna snaga koja se prenosi iz čvorišta 1 u čvorište 2 mreže, $U_1$ = napon na početku, u čvorištu 1 voda, $U_2$ = napon na kraju, u čvorištu 2 voda, $X$ = uzdužna reaktancija voda i generatora, $\delta$ = fazni pomak između napona $U_1$ i $U_2$.

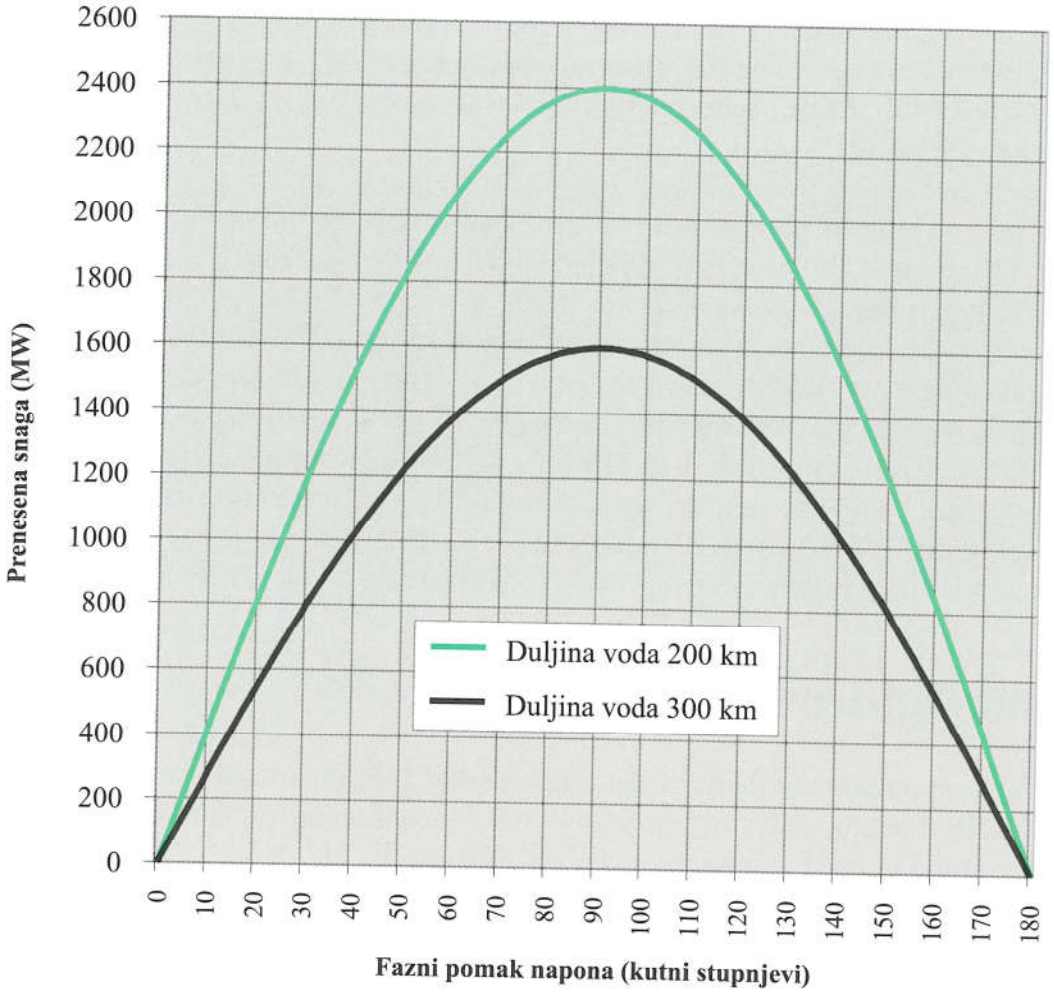
Prijenos je granično stabilan pri tom pomaku manjem od 90°, a realno se dopušta u stacionarnim prilikama do 30°, kako bi ostala rezerva za dinamička stanja.

Maksimalnu snagu koju bismo teoretski mogli prenijeti vodom pod naponom 400 kV duljine 300 kilometara, kojemu je uzdužna reaktancija oko 100 oma, određuje fazni pomak napona na početku i kraju $\delta = 90°$ (tada je sin $\delta = 1$). Ta snaga iznosi 1 600 MW. Uz praktičnu granicu pri $\delta = 30°$ (tada je sin $\delta = 0{,}5$), stabilna prijenosna moć tog voda bila bi 800 MW, slika 7.11. Na slici, prikazana je i snaga koju bismo mogli prenijeti istim vodom, samo duljine 200 kilometara. Područje statičke stabilnosti je do kuta 180° (pri povećanju kuta do toga, snaga raste), nakon toga je statički nestabilno područje (pri daljnjem povećanju kuta, snaga opada – prijenos se *urušava*).

Udvostručenje nazivnog napona, dakle učetverostručuje, a udvostručenje duljine voda smanjuje prijenosnu moć na polovinu.

Istaknimo još jednu važnu pogonsku okolnost – nužnost regulacije napona i jalove snage u prijenosnoj mreži. Prijenos jalove snage posljedica je potražnje jalove snage trošila, transformatora i vodova u mreži, zbog izmjenične uspostave i razgradnje magnetskog polja u njihovim magnetskim krugovima. U tom pogledu, među trošilima osobito se ističu elektromotori, funkcioniranje kojih je nezamislivo bez magnetskog polja u njima. Kompenzacija jalove snage je mjera kojom se jalova snaga proizvodi u čvorištu njezine potražnje i time ne opterećuje prijenos. Ostvaruje se, najelementarnije, kondenzatorom u kojem je vremenski ritam uspostavljanja električnog polja suprotan vremenskom ritmu uspostavljanja magnetskog polja u trošilu, te jalova snaga *njiše* između trošila i kondenzatora ne opterećujući preostalu mrežu.

Elementarno je: prijenos ozbiljnije komponente jalove snage uz komponentu djelatne snage, snižava djelatnu prijenosnu moć voda jer je prijenos termički ograničen ukupnom strujom, a ona rezultira iz djelatne i jalove komponente (jednaka je drugom korijenu iz sume kvadrata djelatne i jalove komponente). Idealno bi bilo da naponi u svim čvorištima mreže budu po veličini posve jednaki. To bi značilo da je u svim čvorištima mreže potražnja jalove




*Slika 7.11. Prenesena snaga vodom* 400 kV
*u ovisnosti o faznom pomaku napona na početku i kraju voda*

snage jednaka proizvodnji jalove snage[90], dakle da je provedena idealna kompenzacija. Generatorima u mreži preostalo bi da proizvode samo djelatnu snagu. Realno, dakako, pogon mreže mora se voditi daleko od toga zamišljenog stanja. Ali, regulacijom napon-jalova snaga u mreži nastoji se približiti tom idealnom cilju.

Veliki manjak jalove snage u nekom sektoru mreže, vodi sniženom naponu u tom sektoru – kritično toliko velikom da vodi tzv. naponskom slomu, kada dolazi do onemogućenja prijenosa i raspada sustava. I veliki višak jalove snage u nekom sektoru mreže (izazvan, primjerice, slabo opterećenim a relativno dugim visokonaponskim vodom) također je neugodan – može dovesti do pretjeranog povišenja napona, pogubnog za izolaciju komponenata prijenosne mreže, ponajprije transformatora. Osobito su neugodni, a uvijek mogući, otkazi (ispadi iz pogona) elektrana, transformatora ili vodova, kada trenutno dolazi do promjene zatečenih tokova snaga u preostalim vodovima i transformatorima i moguće velikog povećanja potrošnje jalove snage u njima, na što trenutno mora odgovoriti povećanje proizvodnje jalove snage kako bi se izbjegao slom sustava.

Inače, regulacijski transformatori, kakvi se uobičajeno primjenjuju u prijenosnim mrežama, pružaju mogućnost da u redovitim pogonskim prilikama daju povoljan napon na

[90] O potrošnji i proizvodnji jalove snage vidjeti potpunije u poglavlju 2, prije relacije (2.19).

svom sekundaru, neovisno o tome koliki je napon na njihovu primaru (dakako do određenih granica odstupanja pogonskog napona od nazivnog napona). Time je u čvorištima za napajanje distribucijskih mreža, u normalnim okolnostima, napon primjerene vrijednosti – ni premalen niti prevelik.

Načelno: trofazni se prijenos može ostvariti nadzemnim vodom visokog napona, ili kabelom – podzemnim ili podmorskim vodom. Drugo rješenje, mnogostruko skuplje od prvoga, koristi se samo ako prvo rješenje nije moguće. Kabel predstavlja kondenzator velikog kapaciteta, kojim trajno teče kapacitivna struja, ako je priključen na izmjenični napon. Uz nekoliko desetaka kilometara duljine kabela, ta struja potpuno bi *zauzela* kabelski vodič i ne bi preostala mogućnost nikakva korisnog prijenosa. Stoga se, u uobičajenim okolnostima, za trofazni prijenos isključivo primjenjuju *nadzemni vodovi* visokog napona, dalekovodi.

Kod premošćivanja morskih prepreka veće duljine primjenjuje se visokonaponski prijenos istosmjernom strujom. Također takav se prijenos primjenjuje kod vrlo dugih nadzemnih vodova (otprilike 700 kilometara i više), kako bi se doskočilo problemu stabilnosti – prijenosna moć stabilnog prijenosa opada s daljinom prijenosa, kako je rečeno.

## Osobitosti distribucijskih mreža

Nazivni napon između faznog i neutralnog vodiča niskonaponske mreže je 230 V, međufazni nazivni napon trofaznog sustava je 400 V, a napon na kućnom priključku ne treba se razlikovati od nazivnog napona za više od ±10 posto[91].

Transformatori u distribucijskim mrežama u pravilu nisu regulacijski, bili bi preskupi a u mrežama ih ima na tisuće (u distribucijskim mrežama Hrvatske oko 26 tisuća!). Stoga je na sučelju prijenosne i distribucijske mreže posljednje mjesto gdje se napon regulira, iza tog mjesta napon je fizikalno neizbježno prepušten opadanju zbog toka struje vodičima vodova i transformatorima. Na krajevima pojedinih vodova, mora se osigurati da pad napona duž voda ne bude toliko velik da ugrožava navedene granice dopuštenog odstupanja napona od nazivnog.

Uzdužni pad napona na vodu s koncentriranim opterećenjem na kraju tog voda, funkcija je struje koja teče tim vodom (možemo reći i snage, opterećenja tog voda na kraju, jer je struja proporcionalna snazi podijeljenoj s naponom), duljine tog voda, faktora djelatne i jalove snage te struje prema naponu, te uzdužnog jediničnog djelatnog otpora vodiča i uzdužnog induktivnog otpora vodiča (jedinični otpor je otpor vodiča po kilometru duljine). Najbolje je napisati relaciju za uzdužni pad napona $\Delta U$ u tom slučaju (u voltima):

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot \ell \, (r \cdot \cos \varphi + x \cdot \sin \varphi). \qquad (7.2)$$

Tu su: $I$ = struja koja teče svakim faznim vodičem tog voda u amperima, $\ell$ = duljina tog voda u kilometrima, $r$ = jedinični djelatni otpor vodiča tog voda u omima/kilometru, x = induktivni otpor vodiča tog voda u omima/kilometru, cos $\varphi$ = faktor djelatne snage i sin $\varphi$ = faktor jalove snage.

Analizirajmo tu relaciju radi utvrđivanja svih utjecaja na pad napona na niskonaponskom ili srednjonaponskom vodu, opterećenim koncentriranim opterećenjem samo na svome kraju.

[91] Prema hrvatskom Pravilniku o normiranim naponima za distribucijske niskonaponske električne mreže i električnu opremu (NN 28/2000) tako je propisano da vrijedi od početka 2010. godine; do tada su dopuštene tolerancije +6%/–10% od nazivnog napona 230/400 V.

Struja je određena potražnjom, uz maksimalnu potražnju koju očekujemo na kraju voda određena je i maksimalna struja. Ona je

$$I = S / (\sqrt{3} \cdot U_2), \tag{7.3}$$

gdje je $S$ prividna snaga na kraju tog voda, na kojem kraju je uspostavljen napon $U_2$.

Ili, poznavanjem djelatne snage $P$ na kraju tog voda te faktora djelatne snage cos $\varphi$, struja je

$$I = P / (\sqrt{3} \cdot U_2 \cdot \cos \varphi). \tag{7.4}$$

Uzdužni pad napona je

$$\Delta U = U_1 - U_2, \tag{7.5}$$

gdje je $U_1$ napon na početku tog voda.

Iz relacije za pad napona, vidljiv je značaj kompenzacije jalove snage u distribucijskoj mreži. Relacija je iznesena za radijalni potez, najzastupljeniji u tim mrežama.

Najprije, struja vodičem određena je omjerom djelatne snage i faktora djelatne snage (P/cos $\varphi$). Što je faktor djelatne snage bliži jedinici, to je taj omjer manji, najmanja struja uz određenu djelatnu snagu ostvaruje se uz faktor djelatne snage jednak 1. Što je faktor djelatne snage manji od jedan, to je struja za određenu djelatnu snagu veća. To izravno utječe na povećanje pada napona, dakle, uz primjerice 10-postotno povećanje struje, povećava se i pad napona za 10 posto itd. (Usput, i gubici na tom vodu uvećavaju se, čak više od pada napona, uz 10-postotno povećanje struje gubici djelatne snage na tom vodu bili bi veći za čak 21 posto, jer gubici rastu s kvadratom struje; $1{,}10^2 = 1{,}21$!)

Faktor djelatne snage (cos $\varphi$) i faktor jalove snage (sin $\varphi$) trigonometrijske su funkcije faznog pomaka $\varphi$ između struje i napona. Nakon povećanja tog pomaka s nule, blago opada kosinusna funkcija, a naglo raste sinusna funkcija. Time se i za male priraste faznog pomaka ostvaruje znatan udio drugog člana u relaciji za pad napona ($x \cdot \sin \varphi$), dok neznatno opada udio prvoga člana ($r \cdot \cos \varphi$), jer je $\cos \varphi \approx 1$ za male fazne pomake $\varphi$. Dakle, pri idealnoj kompenzaciji – tada bi fazni pomak bio $\varphi = 0$, otpao bi posve drugi član u relaciji za pad napona, jer je $\sin 0 = 0$. Dakle, kompenzacijom jalove snage što bliže mjestu njezine potražnje *bitno* se *utječe* na smanjenje pada napona u distribucijskoj mreži.

I hrvatski tarifni sustav za isporuku električne energije to uvažava: potiče kompenzaciju jalove snage na način da se posebno zaračunava potrošnja jalove energije veća od 33 posto potrošnje djelatne energije. Dakle, potiču se potrošači-kupci da kompenziraju svoju potrošnju jalove snage, tako da prosječni faktor djelatne snage bude jednak 0,95 ili bolji (što bliže 1). Dakako, nikako nije korisna prekompenzacija, dakle, da angažirana jalova snaga kompenzacije bude veća od trenutne potražnje jalove snage u nekom čvorištu, jer bi to dovelo do povećanja pogonskog napona u tom čvorištu, moguće većeg od dopuštenog povećanja napona u odnosu na nazivni napon mreže u kojoj je to čvorište. Nužno usklađivanje postiže se regulacijom kompenzacije.

Iskažemo li relaciju za postotni pad napona na vodu poznatog nazivnog napona

$$\Delta u\% = 100 \cdot \Delta U/U_2 \qquad (7.6)$$

i zadamo li tu vrijednost na neki čvrsti iznos (recimo pet posto), to je za vod izveden određenim presjekom vodiča uz određeni geometrijski raspored tih vodiča poznat jedinični djelatni otpor $r$ i jedinična reaktancija $x$. Za neki očekivani faktor djelatne snage (recimo $\cos\varphi = 0{,}95$) određen je i faktor jalove snage ($\varphi$ je u tom slučaju 18,2° pa je $\sin\varphi = 0{,}31$), pa izlazi da je

$$\Delta u\% = 100 \cdot \sqrt{3} \cdot P \cdot \ell \cdot (r \cdot \cos\varphi + x \cdot \sin\varphi) / (\sqrt{3} \cdot U_2^2 \cdot \cos\varphi) \qquad (7.7)$$

$$P \cdot \ell = \text{konst. (za } \Delta u\%,\ U_2,\ r,\ x,\ \cos\varphi = \text{konstantno i zadano).} \qquad (7.8)$$

To je funkcija silazne hiperbole u koordinatnom sustavu $P-\ell$ te se takve hiperbole crtaju za određene presjeke vodiča. Tada označuju doseg dobave određene snage na kraju voda izvedenog vodičima tog presjeka pri stanovitom nazivnom naponu.

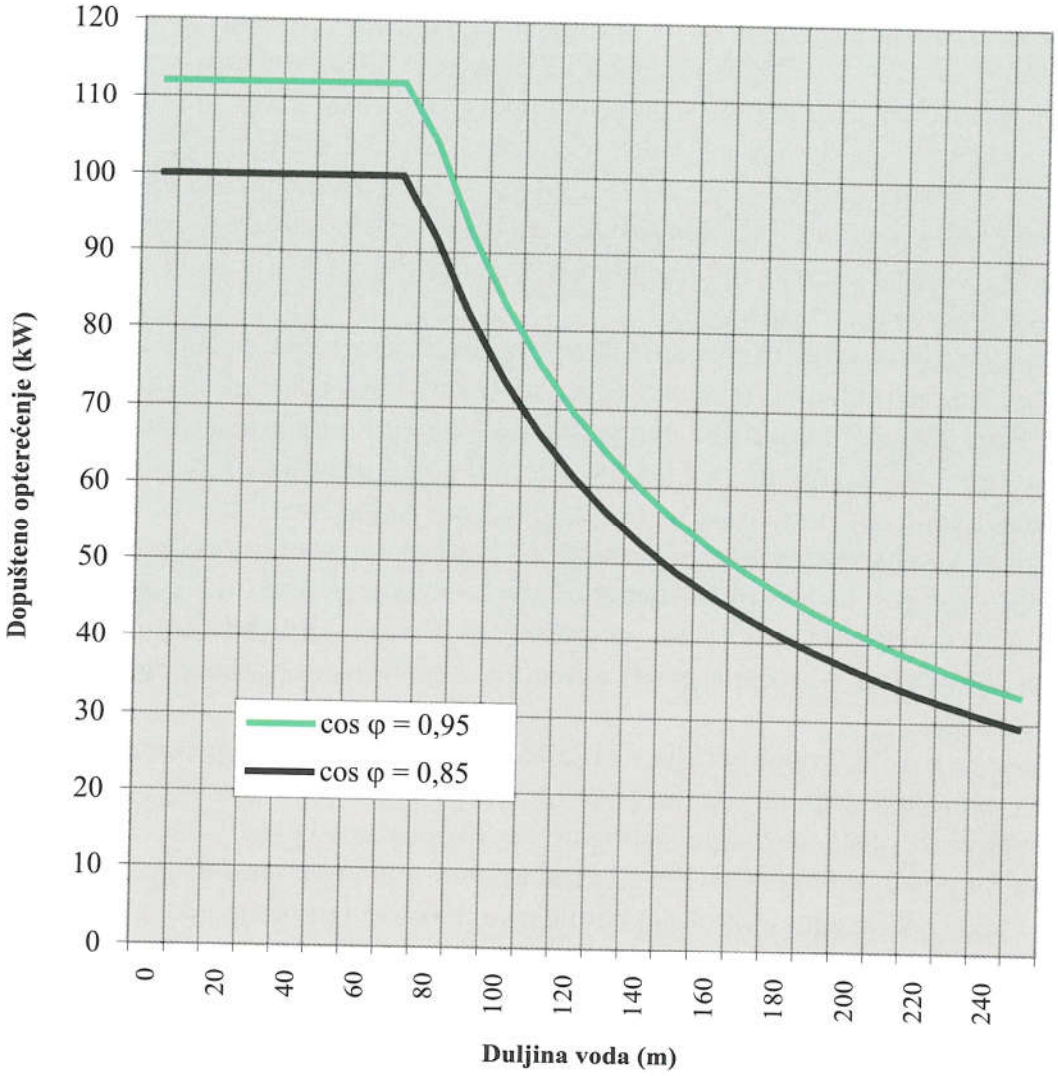
Umnožak $P\cdot\ell$ naziva se *moment snage*. Govori da je veću snagu moguće dopremiti na manju udaljenost istim vodičima, uz očuvanje zadanog postotnog pada napona na kraju voda. I obrnuto: manju snagu moguće je dopremiti na veću udaljenost.

Slika 7.12. prikazuje dopušteno opterećenje, doseg određene trofazne snage za trofazni niskonaponski vod, nazivnog napona 0,4 kV, presjeka vodiča Al/Č 35/6 mm$^2$, opterećenog na kraju, uz faktor djelatne snage 0,95 (tomu ogovara faktor jalove snage 0,31) te pad napona na kraju voda od pet posto. Pri malim udaljenostima javlja se termičko ograničenje, najvećom dopuštenom trajnom strujom promatranim vodičem (170 A, što odgovara trofaznoj djelatnoj snazi od 112 kW, pri faktoru djelatne snage 0,95). Na slici je prikazan i doseg snage uz faktor djelatne snage 0,85, a vidljivo je smanjenje dosega iste djelatne snage.

Srednjonaponske trofazne mreže izvode se trožično, a niskonaponske trofazne mreže četverožično, pri čemu vodovi sadrže tri fazna vodiča i jedan nulvodič. Niskonaponski ogranci mogu biti izvedeni i jednofazno, dakle dvožično (jedan fazni vodič i jedan nulvodič). Nulvodič u niskonaponskim mrežama osigurava moguće trofazno nesimetrično i dakako jednofazno opterećenje u čvorištima tih mreža.

Srednjonaponski vodovi izvode se kao nadzemni ili kabelski vodovi. Niskonaponski vodovi mogu biti u izvedbi: nadzemnih, kabelskih (podzemnih ili podvodnih), samonosivih kabelskih snopova (dakle, položenih nadzemno), te kao vodovi s izoliranim vodičima u zgradama. Vodiči nadzemnih vodova i samonosivi kabelski snopovi mogu biti zavješeni na drvene, betonske ili čelične stupove, a također i na krovne stalke ili zidne konzole. Zaključno s vodovima do brojila pojedinih potrošača-kupaca (priključcima), završava i javna niskonaponska mreža. Vodovi iza brojila razumijevaju se instalacijom potrošača-kupca, a i srednjonaponske i niskonaponske mreže i postrojenja koje bi bile iza brojila, razumijevaju se mrežom i postrojenjima potrošača-kupca.

Srednjonaponske, a osobito niskonaponske, distribucijske mreže u novije doba nastoje se što više izvesti kabelskim vodovima, kablirati. Kabeli predstavljaju zanemariv vizualni utjecaj na okoliš, predstavljaju malenu opasnost za ljude i imovinu u njihovoj blizini, a otporniji su prema utjecajima iz okoliša. Međutim, izloženiji su mehaničkim oštećenjima,




*Slika 7.12. Dopušteno opterećenje na kraju trofaznog voda* 0,4 kV, *presjeka* Al/Č 35/6 mm², *uz pad napona na kraju voda od* 5%

nesmotreno organiziranim radovima u tlu, na ili u blizini njihove trase, izloženi su koroziji u agresivnom tlu, a osobito u morskoj vodi.

Zaštita od kratkih spojeva i preopterećenja vodova u niskonaponskim mrežama, izvodi se prvenstveno rastalnim osiguračima. Oni se kod prevelike struje rastale i time prekinu strujni krug u koji su postavljeni. Pažljivim izborom njihove nazivne struje i izvedbe (tromi ili brzi osigurači), postiže se potrebna selektivnost, dakle to da svaki kvar izazove ispad što manjeg dijela mreže u kojem se zbio. Za zaštitu u srednjonaponskim mrežama koriste se zaštitni uređaji koji daju nalog odgovarajućem prekidaču za isklop ako je struja veća od ugođene struje. Također, koriste se i rastavljači snage kombinirani s rastalnim osiguračem koji su jeftiniji od prekidača i ne traže primjenu složene zaštite koja zahtijeva i posebno sekundarno postrojenje te napajanje tog sekundarnog postrojenja iz akumulatorske baterije s ispravljačem.

Široka primjena rastalnih osigurača u niskonaponskim mrežama, pa donekle i u srednjonaponskim mrežama, vodi tome da velike struje kvara teku vrlo kratko vrijeme, samo par milisekunda, pa ne izlažu opremu i vodove dugotrajnijem zagrijavanju, a ni djelovanju

mehaničkih sila koje se javljaju među vodičima kojima teku velike struje. Prekidač sa zaštitom ne može ostvariti tako kratko vrijeme isklopa, pa je mreža u slučaju primjene prekidača sa zaštitom izložena dugotrajnijem djelovanju povećane struje kvara, od najmanje nekoliko desetaka milisekunda do čak nekoliko sekunda. Međutim, rastalni osigurači ne mogu se proizvesti za visoke napone (veće od 35 kV), pa je time onemogućena njihova primjena u mrežama visokog napona. Također, rastalni osigurači ne omogućuju povoljnu manipulaciju pojedinim izvodima u mreži, dakle, njihov potreban uklop ili isklop; za te svrhe nezamjenjivi su rastavljači snage ili prekidači.

Za distribucijsku mrežu karakterističan je ogroman broj pojedinačnih potrošača-kupaca priključenih na tu mrežu (u Hrvatskoj ima oko dva milijuna potrošača-kupaca). Pretpostavi li se da svaki potrošač-kupac ima barem desetak različitih trošila električne energije, izlazi da su na distribucijsku mrežu priključeni milijuni pojedinačnih trošila (u Hrvatskoj, dakle, par desetaka milijuna). Svako od tih trošila može biti uključeno ili isključeno, svako trošilo ima različite karakteristike potražnje snage u ovisnosti o naponu i frekvenciji, svako trošilo je različito osjetljivo na prekid napajanja električnom energijom i trošila mogu biti sa simetričnim ili nesimetričnim trofaznim opterećenjem, a trošila distribucijskoj mreži ionako su većinom jednofazna, pa time a priori uzrokuju, barem lokalno, nesimetrično opterećenje trofazne mreže.

Toplinska trošila, poput žarulja i grijalica, imaju kvadratnu ovisnost njihove djelatne snage o pogonskom naponu, dakle, povećanje tog napona za 10 posto vodi povećanju njihove snage za 21 posto, a smanjenje pogonskog napona za 10 posto vodi smanjenju njihove snage za 19 posto ($0{,}90^2 = 0{,}81$). Kod elektromotora je naglašeno drugačije. Prije svega, njihovi magnetski krugovi uzrokuju nelinearnu ovisnost potražnje jalove snage o naponu. S druge strane, ako su opterećeni stanovitom mehaničkom snagom na svojoj osovini, isto toliku snagu potražuju i pri promjeni pogonskog napona, dakle, pri povišenom ili sniženom pogonskom naponu, djelatna snaga koju potražuju iz mreže bit će jednaka. To dovodi do toga da uz sniženje pogonskog napona raste struja koju ti motori povlače iz mreže, jer je snaga umnožak struje i napona, pa ako se napon smanji, struja mora porasti kako bi umnožak ostao isti.

Nepažljivo uključenje motora u zaustavljanju (ne posve zaustavljenog), uslijed prekida napajanja, može izazvati trajno oštećenje motora. Stoga, elektromotori većih snaga moraju biti osigurani od ponovnog uključenja neposredno nakon što je nestalo napona za njihovo napajanje.

To sve utječe na vrlo važnu dinamiku pogona i održavanja distribucijske mreže. Doda li se tome i velika prostorna disperzija distribucijskih potrošača-kupaca, praktički ih ima na gotovo svakom četvornom kilometru državnog teritorija, dobiva se potpuna slika o složenosti vođenja pogona i održavanja distribucijske mreže. U dijelovima te mreže gdje je veća gustoća opterećenja, troškovi pogona i održavanja po jedinici distribuirane električne energije su manji, ali u zonama male gustoće potrošnje, ti troškovi znaju biti veći od sredstava prikupljenih prodajom električne energije.

Zbog velike razgranatosti distribucijskih mreža i potrebe stalne dogradnje tih mreža, i investicijski troškovi njezinog uzdržavanja su visoki. Svakoga se dana pusti u pogon barem jedna nova transformatorska stanica 10/0,4 kV ili 20/0,4 kV u Hrvatskoj u pogon, dakako, s pripadnim vodovima s gornjonaponske i donjonaponske strane. To je razlog primjeni standardizacije i visoke unifikacije svih komponenata jedinica distribucijske mreže, jer se

samo time ostvaruje štedljivija izgradnja, pogon i održavanje te mreže. Time se osobito smanjuju troškovi održavanja, jer se bitno smanjuje asortiman potrebnih rezervnih dijelova, alata i postupaka.

## Primjena energetske elektronike u mrežama izmjenične struje

Dvije glavne mane trofaznog prijenosa karakteriziraju prijenos nadzemnim, odnosno kabelskim vodom. Uzdužni induktivni otpor nadzemnog voda, razmjeran njegovoj duljini, izaziva gubitak napona na vodu, a neposredno smanjuje i moguću snagu prijenosa (stabilnost prijenosa!). Uopće se ne manifestira na taj način, ako vodom teče istosmjerna struja. Kapacitetom vodiča prema plaštu kabela teče struja ako je kabel priključen na izmjenični napon, to veća što je veća duljina kabela. Time je kabel manje raspoloživ za prijenos, jer je presjek njegova vodiča *zauzet* tom – nekorisnom – kapacitivnom strujom. Priključkom na istosmjerni napon, kabel se električki nabije i nakon toga više ne teče struja nabijanja.

Iz toga proizlazi da pri nekoj duljini nadzemnog prijenosa (više stotina kilometara) i pri nekoj daljini kabelskog prijenosa (nekoliko desetaka kilometara), prijenos trofaznom strujom visokog napona nije moguć bez dodatnih tehničkih mjera koje nisu nezamislive, ali su teško izvodljive ili/i skupocjene.

Dva elektroenergetska sustava različitih pogonskih frekvencija (primjerice 50 i 60 Hz) ne mogu se uopće međusobno povezati, kao i sustavi u kojima je regulacija snaga-frekvencija različita. Dva snažna elektroenergetska sustava ne mogu se povezati vodom neprimjereno male prijenosne moći, jer bi ga mogući veliki iznenadni udari snage izbacivali iz pogona upravo kada je njegov doprinos nastalom debalansu najpoželjniji.

Povezivanje neke zaokružene slabe mreže s drugom snažnom mrežom uz koju se razvijala neovisno, dovodi do velikog povećanja struja kratkog spoja u prvoj mreži. Na to oprema i vodiči u toj mreži nisu pripremljeni, pa se povezivanje ne može provesti ako se sva oprema ne zamijeni otpornijom na kratki spoj, što može biti teško izvedivo ili neprihvatljivo skupo.

Svim tim manama odolijeva primjena istosmjerne struje za prijenos, umjesto izmjenične: *prijenos istosmjernom strujom visokog napona*[92]. Primjenu je omogućilo korištenje živinim usmjerivačkim ventilima (elektronske cijevi s živinim parama pogodne za vođenje velikih struja pri relativno visokim naponima), a zamah je nastupio pojavom tiristorskih ventila (tiristor je upravljiva poluvodička dioda).

Opravdano je zamišljati kako će razvoj velikih interkonekcija, a pogotovo međusobno povezivanje velikih interkonekcija, vjerojatno s vremenom ići u smjeru skladnog prožimanja izmjeničnog i istosmjernog prijenosa, jer će to omogućiti sve zanimljivija pogonska svojstva i sve niža cijena usmjerivača. Od 1972. godine počinje primjena tiristorskih ventila, pa broj istosmjernih prijenosa i ukupna instalirana snaga rastu. Danas, početkom tisućljeća (2005), u svijetu je okruglo 100 takvih prijenosa u pogonu, ukupne instalirane snage preko 75 gigavata. Samo u Sjevernom i Baltičkom moru položeno je deset kabelskih prijenosa istosmjerne struje.

[92] HVDC = High Voltage Direct Current (engl.), HGÜ = Hochspannung-Gleichstrom-Übertragung (njem.)

Razvoj energetske elektronike velike snage (poluvodički tiristorski sklop visokog napona i velikih struja sa složenim regulacijskim svojstvima) potican najprije potrebama specifičnih primjera prijenosa rješavanih prijenosom istosmjernom strujom, omogućio je i neke nove neposredne primjene u mrežama izmjenične struje[93].

Elementarni primjer je tzv. regulirana statička kompenzacija jalove snage, za razliku od rotacijske kompenzacije ostvarene sinkronim strojem. Naime, do primjene energetske elektronike, statička se kompenzacija rješavala primjenom kondenzatorskih baterija, a njezina regulacija bila je moguća samo stupnjevito: uključenjem-isključenjem pojedinih slogova kondenzatora. To komplicira i poskupljuje izvedbu, pogotovo na višem naponu jer manipulacija svakim kondenzatorskim slogom traži svoj skupocjeni prekidač. Ako se načini malo stepenica, a samo tako je novčano prihvatljivo, regulacija je previše gruba i moralo se posezati za sinkronim rotacijskim kompenzatorom koji se može regulirati kontinuirano ali je skupocjen investicijski, te u pogonu i održavanju. Ne može se priključiti neposredno na visoki napon, nego na srednji napon – transformator za povezivanje novi je izvor gubitaka jalove snage i troškova.

Sklop koji sadrži kondenzatore i prigušnice zajedno s upravljivim tiristorima u tim granama može mijenjati struju kroz kondenzatore i prigušnice, čime se ostvaruje kontinuirana promjena jalovog opterećenja u čvorištu mreže, od kapacitivnog do induktivnog – ako treba. Takvim sklopom može se povećati prijenos djelatne snage trofaznim vodom, jer se može urediti da se svako jalovo opterećenje kompenzira, a prijenosna moć *oslobodi* isključivo za djelatno opterećenje. To je paralelna kompenzacija (priključena paralelno vodu).

Druga primjena sklopova energetske elektronike je u serijskoj kompenzaciji (priključenoj serijski u vod). Kako je već rečeno, ograničenje prijenosa trofaznom izmjeničnom strujom dugim vodovima predstavlja uzdužni induktivni otpor razmjeran duljini voda. Ako se serijski u vodiče priključe kondenzatori, njihov kapacitivni otpor i induktivni otpor voda se kompenziraju. Ako je taj kapacitivni otpor regulabilan, upravljivom tiristorskom regulacijom može se utjecati na ukupni jalovi otpor voda, dakle na veće ili manje opterećenje tog voda a time i na raspodjelu opterećenja vodova, tokove snaga, u većem dijelu ukupne povezane mreže.

Visokonaponske prijenosne mreže vode se u prstenastom režimu pogona (nasuprot radijalnom pogonu kakav je uglavnom uobičajen za srednjonaponske i niskonaponske mreže). Takav režim povećava pouzdanost ostanka u pogonu svih čvorišta u mreži, nakon kratkotrajnog ili konačnog ispada pojedinog voda iz pogona. Međutim, ima manu da se u normalnim pogonskim prilikama mreže znaju uspostaviti tokovi snaga (Kirchhoffovi zakoni!) nepoželjni prema glavnim pravcima prijenosa; neki su vodovi jako opterećeni, a neki podopterećeni, te su gubici u mreži veći no kada bi raspored bio ravnomjerniji. Ugradnjom odgovarajuće FACTS-naprave u prikladno izabranu granu mreže, može se ostvariti preraspodjela tokova snaga u poželjnom pravcu.

Na sličan način djeluje i istosmjerni prijenos uključen u mrežu između čvorišta među kojima postoji trofazni izmjenični prijenos. Regulacijom snage koja se prenosi istosmjernim vodom utječe se na snagu koja preostaje za prijenos trofaznim vodom, te se može postići najbolja ukupna ekonomičnost prijenosa. U svim opisanim slučajevima, došli smo do *aktivne* mreže, koja mijenja svoje parametre prema nastalim prilikama i potrebama s neznatnom vremenskom zadrškom.

---

[93] To su tzv. FACTS-primjene (Flexible Alternating Current Transmission System).

## Veličina prijenosne i distribucijske mreže u Hrvatskoj

Prijenosna (vidjeti sliku 22.25) i distribucijska mreža u Hrvatskoj imala je krajem 2005. godine sljedeću veličinu[94]:

| | |
|---|---|
| – duljina vodova 400 kV | 1159 km |
| – duljina vodova 220 kV | 1233 km |
| – duljina vodova 110 kV | 4866 km |
| – duljina vodova 35(30) kV | 4594 km |
| – duljina vodova 20 kV | 3890 km |
| – duljina vodova 10 kV | 29836 km |
| – duljina mreže 0,4 kV | 61645 km |
| – duljina kućnih priključaka 0,4 kV | 28363 km |
| – transformatorske stanice 400 kV | 5 kom |
| – transformatorske stanice 220 kV | 6 kom |
| – transformatorske stanice 110 kV | 107 kom |
| – transformatorske stanice 35(30) kV | 352 kom |
| – transformatorske stanice 20 kV | 2806 kom |
| – transformatorske stanice 10 kV | 21568 kom |

Ukupna instalirana snaga svih transformatora u prijenosnoj mreži Hrvatske bila je 2005. godine oko 11 000 MVA, a u distribucijskoj mreži oko 13 500 MVA. Tome, treba dodati instaliranu snagu transformatora u elektranama, oko 1 600 MVA, te transformatore kod izravnih kupaca-potrošača, oko 1 000 MVA.

## Troškovi izgradnje prijenosne i distribucijske mreže

Troškovi izgradnje jedinica mreže (vodova, transformatorskih stanica i jedinica za kompenzaciju jalove snage), najviše ovise o nazivnom naponu mreže o kojoj je riječ te o osnovnoj izvedbi tih jedinica (vodovi: nadzemni ili kabelski, a postrojenja: u vanjskoj ili unutrašnjoj izvedbi). Značajno na troškove izgradnje utječu klimatski uvjeti (vjetar, zaleđivanje), terenski uvjeti (ravnica, brdoviti ili planinski teren, zaposjednutost terena – šume, oranice, nepristupačni tereni, urbani predjeli, po čemu osobiti tereni) i novčana naknada koju traže zatečeni korisnici prostora za ustupanje tog prostora radi izgradnje jedinica mreže. Velike su razlike u troškovima radne snage za izgradnju, promatraju li se razne zemlje.

[94] Radi usporedbe: primjer njemačke mreže. Ukupna duljina mreža svih napona sadrži 2004. godine više od 1,65 milijuna kilometara kabela i nadzemnih vodova! U desetgodišnjem razdoblju ostvaren je prirast od 140 tisuća kilometara (*to je nešto više nego li sveukupna duljina mreža u Hrvatskoj*). Udio kabelske mreže povećao se sa 65 na 71 posto.

*Duljine mreža u Njemačkoj 2004.* (1 000 km)

| | |
|---|---|
| Visoki i vrlo visoki napon | 112 |
| Srednji napon | 492 |
| Niski napon | 1 050 |
| Ukupno | 1 654 |

*Izvor: www.strom.de/25.07.2005*

Najveći dio te mreže čini niskonaponska mreža (63 posto), slijedi srednjonaponska (30 posto) i visokonaponska, napona 110 i 220 kV, te mreža vrlo visokog napona, kako Nijemci zovu mrežu 380 kV (7 posto).

Orijentacijske vrijednosti troškova izgradnje jedinica prijenosne i distribucijske mreže, prema sadašnjim hrvatskim (prosječni europski su nešto viši od tih) prilikama i prema raznim izvorima podataka, navedene su u tablici 7.3. Ako je to bilo potrebno, korišten je tečaj pri preračunu: 1 euro = 7,35 kuna.

*Tablica 7.3 Troškovi izgradnje jedinica mreže*

| Jedinica mreže | Jedinica | Troškovi izgradnje |
|---|---|---|
| Nadzemni jednostruki vod 400 kV | tisuća €/km | 220 |
| Nadzemni dvostruki vod 400 kV | tisuća €/km | 375 |
| Nadzemni jednostruki vod 220 kV | tisuća €/km | 110 |
| Nadzemni dvostruki vod 220 kV | tisuća €/km | 170 |
| Nadzemni jednostruki vod 110 kV | tisuća €/km | 85 |
| Nadzemni dvostruki vod 110 kV | tisuća €/km | 135 |
| Nadzemni jednostruki vod 35 kV | tisuća €/km | 50 |
| Nadzemni jednostruki vod 10 ili 20 kV | tisuća €/km | 35 |
| Nadzemni vod 0,4 kV | tisuća €/km | 27 |
| Kabelski vod 400 kV | tisuća €/km | 2000 |
| Kabelski vod 110 kV | tisuća €/km | 725 |
| Kabelski vod 35 kV | tisuća €/km | 45 |
| Kabelski vod 10 ili 20 kV | tisuća €/km | 40 |
| Kabelski vod 0,4 kV | tisuća €/km | 27 |
| Transformatorska stanica 400/110 kV | milijuna € | 30 |
| Transformatorska stanica 220/110 kV | milijuna € | 20 |
| Transformatorska stanica 110/20 kV | milijuna € | 8 |
| Transformatorska stanica 10(20)/0,4 kV | tisuća € | 40 |
| Stupna transform. stanica 10(20)/0,4 kV | tisuća € | 15 |

Dakako, točnije razvrstavanje prema troškovima izgradnje vodova ovisi o materijalu (aluminij, alučelik ili aluminijska legura) i presjeku vodiča, vrsti izolacije, a kod nadzemnih vodova i o materijalu (drvo, beton, čelik...) i izvedbi stupova.

Troškovi izgradnje transformatorskih stanica ovise o izboru stupnja pouzdanosti stanice: jednostavna stanica s minimalnim brojem ugrađenih aparata ili složenija stanica s višestrukim sabirnicama (najčešće dvostrukim) ili s više od jednog prekidača po polju. Dalje, troškovi ovise o broju polja u postrojenjima tih stanica, o broju i kvaliteti ugrađenih transformatora te svih ugrađenih aparata, o obuhvatu i kvaliteti pomoćnih postrojenja u stanicama, te o stupnju automatizacije i obuhvatu daljinskim upravljanjem.

U tablici 7.3. navedene su doista prosječne vrijednosti, neovisno od svih tih parametara. S tim u vezi, navedimo podatak kako su prosječni europski troškovi izgradnje dvostrukog voda 400 kV oko 400 tisuća eura po kilometru, da u Finskoj, Švedskoj, Portugalu i Grčkoj to stoji 200–300 tisuća eura, a u Velikoj Britaniji, Austriji i Švicarskoj 600–800 tisuća eura. Povoljni terenski razlozi i mala gustoća naseljenosti u Finskoj i Švedskoj, niske cijene zemljišta i radne snage u Portugalu i Grčkoj, velika tražena pouzdanost vodova i velika gustoća naseljenosti u Velikoj Britaniji, te veliki troškovi zaštite okoliša, teške topografske

okolnosti (brdovitost, vjetar, led) i visoki troškovi radne snage u Austriji i Švicarskoj, dovode do te razlike.

Troškovi pogona i održavanja prijenosne i distribucijske mreže prikazani su mrežarinama, u poglavlju o cijenama električne energije (poglavlje 21). orijentacijski, iznose prosječno oko 0,5–1,5 eurocent/kWh za prijenosnu mrežu i oko tri puta više za distribucijsku mrežu, pri korištenju na niskonaponskoj razini. Ovise o veličini i cijeni energije za pokriće gubitaka u tim mrežama, vrijednosti osnovnih sredstava i trajanju amortizacijskog razdoblja, te o komercijalnim uvjetima izgradnje, o kvaliteti održavanja i troškovima zaposlenih radnika. Troškove pogona čine i razne naknade koje se plaćaju lokalnoj i široj društvenoj zajednici, na čijem prostoru su uspostavljeni objekti tih mreža.

# 8

# Elektroenergetski sustavi i njihovo povezivanje

Trofazni prijenos većih snaga na veće udaljenosti omogućio je tvorbu elektroenergetskih sustava, najprije regionalnih, a potom državnih razmjera. Konačno: takvi se državni sustavi međusobno povezuju u interkonekcije kontinentalnih razmjera.

Što su glavni razlozi tome?

## Izolirani rad (*otočni rad*) elektrana

Ako bi se jedna zaokružena potražnja[95] namjeravala opskrbiti jednom termoelektranom snage jednake očekivanoj potražnji, to bi bilo nesigurno rješenje. Kvar elektrane prouzročio bi totalnu obustavu isporuke. Ako bi se potrebna snaga ostvarila s dva agregata u elektrani (svaki 50 posto potrebne snage) i tome dodao još jedan isto takav za rezervu, dobili bismo znatno sigurnije ali i mnogo skuplje rješenje; instalaciju za 50 posto veću od vršnog opterećenja. Potražnja bi bila zadovoljena u slučaju neistodobnog zastoja bilo kojeg agregata.

Međutim, takvo rješenje stanje čini nesigurnim u razdoblju nužnog godišnjeg remonta bilo kojeg agregata, ako je raspored potražnje takav da u vrijeme remonta (uobičajeno: ljeto, ili drugo razdoblje kada je manja potražnja) nije dovoljan samo jedan agregat. Najvjerojatnije, bi trebalo ugraditi još jedan agregat da se ostvari povoljna sigurnost: u razdobljima kada trebaju biti dva u pogonu – treći je u rotacijskoj rezervi, a četvrti u hladnoj rezervi. Ali, to znači instalaciju veću za 100 posto od vršnog opterećenja, te praktički udvostručenu investiciju. Troškovi pogona također bili bi znatno iznad prihvatljivih, jer bi na malu ostvarenu proizvodnju (oko 50 posto u odnosu na mogućnosti) trebalo rasporediti velike stalne troškove. I promjenjivi troškovi bili bi nepovoljni, jer je u vrtnji neprekidno barem 50 posto više snage nego li je opterećenje – stupanj iskorištenja goriva je manji pri manjem opterećenju nego pri većem opterećenju agregata.

Okolnosti postaju još složenije ako su prirodne okolnosti takve da se nameće privlačno rješenje opskrbe hidroelektranom (nema troškova za gorivo, praktično postoje samo fiksni troškovi). Međutim, koliku bi snagu isporučitelj smio garantirati potrošačima? Samo onoliku kolika odgovara dotoku vode u najsušnijim okolnostima. To je najčešće znatno manje od prosječnih okolnosti, te bi takva hidroelektrana zapravo nerazumno zauzela lokaciju s neprimjereno malom snagom i proizvodnjom.

Izgradi li se ipak veća hidroelektrana, za razdoblja manjih dotoka vode mora se izgraditi i odgovarajuća termoelektrana. Umjesto očekivane jeftine energije iz hidroelektrane, dobiva se zapravo visoka prosječna cijena. Naime, termoelektrana će biti slabo iskorištena (samo za dopune – kada nema vode), pa bi ono što ona proizvede bilo i vrlo skupo. Ostvarili bi se i preljevi vode, jer termoelektrana ne može biti u pogonu ispod

[95] Potražnja električne energije kakva zaokruženog područja često se naziva *konzum*. To je skupina potrošača-kupaca, karakterizirana njihovom zajedničkom potražnjom električne energije, po vrijednosti snage i dinamici te potražnje; zajedničko opterećenje koje izaziva skupina potrošača-kupaca na kakvoj razini – od lokalne (primjerice: na razini jedne TS 10/0,4 kV), do regionalne, državne ili europske, ali moguć je i konzum jednog-jedinog potrošača-kupca.

primjerenog opterećenja (tehnički minimum). Kada je dotok toliki da se mora angažirati i termoelektrana, to odmah mora biti barem tehnički minimum, pa bi bilo teško izbjeći preljeve u hidroelektrani.

Rješenje s akumulacijskim bazenom, ako je takav bazen prirodno uopće moguć, bilo bi opet skupocjeno i ekološki neprivlačno: da se osigura potrebna dobava i u najsušnijim godinama, bazen bi trebao biti vrlo velikog volumena.

Sve skupa naglašeno se komplicira, ako se promatra u višegodišnjem hodu. Potražnja nezaustavljivo raste, uglavnom ravnomjerno. Treba pravodobno započeti izgradnjom novog agregata, koji bi – opet – u početnim godinama pogona bio nepotpuno iskorišten.

## Elektroenergetski sustav

Elementarna potreba da se električki povežu najčešće udaljena mjesta na kojima je moguće i povoljno proizvoditi električnu energiju i mjesta na kojima je potrebno njezino korištenje, dovela je do zamišljaja prijenosa i do trofaznog rješenja, prije više od sto godina. No, ubrzo je ta zamisao izrodila znatno zanimljivije *čedo*: *elektroenergetski sustav*.

Sve neprilike spomenute uvodno ublažava sustav u kojemu su hidroelektrane skladno dopunjene termoelektranama, koji je po prostranstvu dovoljno velik da obuhvaća vodotoke različitih rasporeda dotoka (kada u jednom nastupaju velike vode u drugom su u pravilu mali dotoci i obrnuto). U tom sustavu grade se i termoelektrane različitih energetsko-ekonomskih karakteristika, kako bi se i one upotpunjavale: one s većim stalnim troškovima i manjim promjenjivim troškovima (za temeljnu, ravnomjernu, proizvodnju što više energije) i onih s manjim stalnim troškovima i skupim gorivom (za ionako malu ali nužnu, povremenu proizvodnju vršne energije). U takvom sustavu prihvatljiva je i izgradnja velikog akumulacijskog bazena, jer će se njegovi veliki stalni troškovi raspoređiti na veliku količinu ukupno isporučene energije.

Želimo ponovno naglasiti: konačni proizvod javne elektroprivrede – električna energija – raspoloživ za distribucijski sustav radi dovođenja do potrošača-kupaca, uz prihvatljiva očekivanja sigurnosti dobave, cijene i kvalitete, nastaje tek kooperativnim radom elektrana različitih tehničkih/energetskih karakteristika i prijenosne mreže koja takav skup elektrana povezuje međusobno i s potrošačkim čvorištima, što čini elektroenergetski sustav. Proizvodnja hidroelektrane jest doduše znatno jeftinija od proizvodnje termoelektrane, međutim, izvan elektroenergetskog sustava hidroelektrana ne bi imala kupaca – koji bi pristali da koriste električnu energiju u ritmu dotoka vode.

U elektroenergetskom sustavu se i potrošačke karakteristike korisno upotpunjavaju – ako je područje dovoljno veliko. Tada će biti obuhvaćene i gradske, i industrijske, i poljoprivredne i turističke regije. Dnevne, tjedne i godišnje oscilacije potražnje tih područja međusobno se razlikuju, pa njihov zbroj može biti znatno ravnomjernije raspoređen tijekom cijele godine od rasporeda u svakoj regiji za sebe. Zahvaćanje i dovoljno različitih klimatskih područja iziskuje još veći teritorijalni obuhvat, osobito u smjeru sjever–jug. Tada će primjerice turistička potražnja ljeti zgodno dopunjavati smanjenu potražnju industrije, a svojim izostankom zimi, ostavljati mogućnost povećanoj potra-

žnji hladnijih krajeva. Sve to, uz manju izgradnju elektrana ali odgovarajuću izgradnju prijenosne mreže.

Kako ulaganja u izgradnju elektrana čine 50–60 posto svih ulaganja u elektroenergetski sustav (u proizvodnju, u prijenos i u distribuciju), a u prijenosnu mrežu 10–15 posto – uvijek je privlačno razmotriti pitanje: da li se poželjno stanje sustava ekonomičnije postiže dogradnjom prijenosne mreže ili dogradnjom elektrana. To vodi ubrzanom rastu prijenosa od proizvodnje, odnosno potražnje električne energije. U postojećoj prijenosnoj mreži potencijalno se može naći novi potez, pogon kojega bi doveo do smanjenja gubitaka u prijenosnoj mreži, podjednakog proizvodnji kakve male elektrane na nekonvencionalni izvor energije. Ako je trošak izgradnje te elektrane veći od troška izgradnje dalekovoda, razumnije je izgraditi vod. Osim smanjenja gubitaka u mreži, novi vod će dovesti i do povećanja sigurnosti pojedinih čvorišta prijenosne mreže.

Razvidno je kako je gradnja elektrana velikih snaga ekonomičnija ako se ugrađuju veće turbo-generatorske jedinice (ostala elektranska infrastruktura ne raste sa snagom generatora linearno nego prigušeno). Takve se elektrane mogu bolje iskoristiti, a može se osigurati i kontinuirana opskrba potrošača, ako su međusobno povezane dalekovodima. To međusobno povezivanje i opskrba udaljenih potrošačkih područja značilo je stvaranje prvih prijenosnih mreža i prvih elektroenergetskih sustava.[96]

Zadatak je elektroenergetskog sustava opskrba potrošača-kupaca (točnije: njihovih trošila) električnom energijom. U tome sudjeluju svi dijelovi sustava: generatori, transformatori, vodovi. Električna energija koja se predaje potrošačima-kupcima mora biti kvalitetna. Mjerila kvalitete su frekvencija, napon i raspoloživost.

Sve aktivnosti vezane uz pogon, održavanje i izgradnju elektroenergetskog sustava treba usmjeriti tako da sustav uz zadovoljavajuću kvalitetu trajno daje potrošačima električnu energiju uz najnižu moguću cijenu. U tome izvanredno važnu ulogu igra prijenosna mreža, jer omogućuje međusobno povezivanje i nadopunu u radu s jedne strane elektrana, a s druge strane potrošača, s vrlo različitim karakteristikama i lokacijama. Drugim riječima, prijenosna mreža omogućuje ekonomično i sigurno vođenje elektroenergetskog sustava (dispečiranje, odnosno raspodjelu električne energije).[97]

Elektrificirati zemlju znači razvijati takav elektroenergetski sustav koji bi u svako vrijeme zadovoljavao potrebe u električnoj snazi i energiji i po količini i po kvaliteti. Elektroenergetski sustav čine četiri osnovne jedinice: električni izvori, transformatori, vodovi i *trošila*. Te četiri jedinice tvore jednu cjelinu. Međusobno su galvanski ili elektromagnetski povezani. Svaka jedinica radi kao neodvojivi dio sustava.[98]

Najvažnije zadaće elektroenergetskog sustava proizlaze iz fizikalne naravi električne energije – neodvojive od mreže i neuskladištive: namirenje promjenjive potražnje, najpovoljnije iskorištenje izvora prirodnih oblika energije i osiguranje rezerve.

Već početkom 20. stoljeća nastaju regionalni sustavi, potom sustavi na državnoj razini, a već više od pola stoljeća traju i međudržavna povezivanja.

---

[96] H. Požar: Snaga i energija u elektroenergetskim sistemima. Prvi svezak, drugo izdanje. Informator-Zagreb, 1983. Str.11.

[97] M.i K. Ožegović: Električne energetske mreže. Svezak I. FESB-Split, 1996. Str.1-2.

[98] S. Despotović: Osnovi analize elektroenergetskih sistema. ZJE-Beograd, 1962. Str.15.

## Povezivanje elektroenergetskih sustava – elektroenergetske interkonekcije

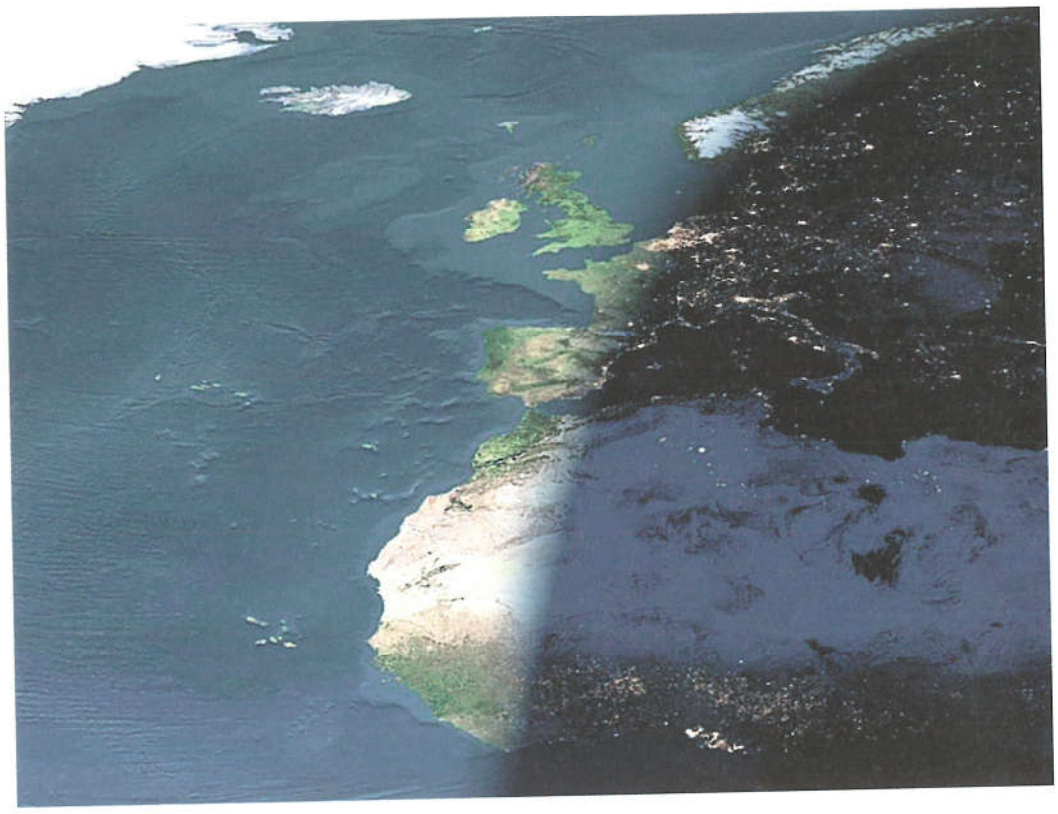
Elektrane velikih ukupnih snaga i velikih jediničnih snaga agregata traže ulaganje manje novca po jedinici snage pri izgradnji i manji su troškovi pogona po jedinici energije – te prednosti ne mogu se iskoristiti ako je sustav malen.

Rotacijska rezerva treba biti barem jednaka snazi najvećeg agregata – u malenom sustavu to traži angažman i najneekonomičnijih elektrana.

Veći sustav je tromiji prema naglim promjenama – s manjim udjelom regulacijskih elektrana postiže se povoljna stalnost frekvencije. Potrebna regulacijska snaga ovisi o drugom korijenu vršnog opterećenja; 100 puta veći sustav traži za regulaciju samo 10 puta veću snagu.

Povezivanjem više državnih (ili unutardržavnih, u država velikih prostranstava) elektroenergetskih sustava nastaju *elektroenergetske interkonekcije*[99] (interkonektirani elektroenergetski sustavi), i to radi:

– potpunijeg iskorištenja novih velikih ekonomičnih elektrana, dakle njihova potpunog angažiranja odmah nakon izgradnje,



*Slika 8.1. Nastup noći nad Europom i sjevernom Afrikom*

[99] interconnected power systems (engl.), Verbundsystem (njem.). Razlikovati treba pojam interkonekcije od pojma interkonekcijskih (spojnih) vodova, koji međusobno povezuju elektroenergetske sustave u interkonekciju. Ti se vodovi nazivaju spojni vodovi ili interkonekcijski vodovi; interconnector (engl.); Verbindungsleitung (njem.).

- boljeg kombiniranja različitosti hidroloških i potrošačkih karakteristika pojedinih sustava, izbjegavanja preljeva u hidroelektranama i smanjenja utroška goriva u termoelektranama,
- smanjenja rotacijske i hladne rezerve u sustavima, uz povećanu sigurnost u svim međusobno povezanim elektroenergetskim sustavima.

Ako je interkonekcija dovoljno velika u smjeru istok–zapad, zona s vršnim dnevnim opterećenjem *putuje* sa Suncem – ukupno istodobno opterećenje interkonekcije manje je od zbroja vršnih opterećenja pojedinih interkonektiranih sustava. Lijepo se to vidi na slici 8.1. gdje je satelitskim snimkom prikazan nastup noći nad Europom; dok su London i Lisabon još osunčani, u Parizu je upravo uključena ulična rasvjeta. U Rimu, a pogotovo u još istočnijim dijelovima Europe, već je dulje vrijeme uključena – u Moskvi se ljudi već spremaju na spavanje, zamiru dnevne aktivnosti[100].

Dakako, u manjoj mjeri sve se to postiže već pri oblikovanju državnog elektroenergetskog sustava – međutim, interkonekcijom takvih sustava koristi su još naglašenije.

## Europske elektroenergetske interkonekcije

U Europi su se nakon Drugog svjetskog rata oblikovale četiri velike elektroenergetske interkonekcije:

- zapadnoeuropska interkonekcija UCPTE, Unija za koordinaciju proizvodnje i prijenosa električne energije, koja od 1951. godine obuhvaća elektroenergetske sustave osam zemalja: Austrije, Belgije, Francuske, Italije, Luksemburga, Nizozemske, Njemačke (tadašnje Savezne Republike) i Švicarske. Njima su 1961. godine pridružene zemlje interkonekcije UFIPTE[101] (uz Francusku, obuhvaća Portugal i Španjolsku) i 1964. godine zemlje interkonekcije SUDEL[102] (regionalna skupina jugoistočnih elektroenergetskih sustava UCPTE, koja je uz Austriju i Italiju obuhvaćala tadašnju Jugoslaviju i Grčku) u sinkronom pogonu Italije i Jugoslavije od 1974. godine, s Austrijom od 1975. godine, te s Grčkom od 1976. godine;
- sjevernoeuropska interkonekcija NORDEL[103], koja od 1963. godine obuhvaća Dansku, Finsku, Norvešku, Švedsku i Island (Island, u odvojenomu radu);
- istočnoeuropski objedinjeni energetski sustav OES[104], od 1960. godine, interkonekcija koja je obuhvaćala europske zemlje-članice nekadašnjeg Savjeta za ekonomsku pomoć (SEV[105]): Bugarsku, tadašnju Češkoslovačku, Mađarsku, tadašnju Njemačku Demokratsku Republiku, Poljsku, Rumunjsku i jugozapadni dio jedinstvenog elektroenergetskog sustava tadašnjeg SSSR (Moldavija i Ukrajina);

---

[100] I računanje vremena tom je podvrgnuto; dok je u srednjoj Europi (i Hrvatskoj) primjerice 20 sati, u Velikoj Britaniji je 19 sati a u Moskvi već 22 sata.

[101] Union Franco-Ibérique pour la Coordination de la Production et du Transport de i'Electricité

[102] Groupe Regional pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Energie Electrique entre l'Austirche, la Grece, l'Italie et la Yougoslavie

[103] Organisasjon for nordisk elsamarbeid (šved.)

[104] Объединенные енергосистемы (rus.)

[105] SEV, Savjet za ekonomsku uzajamnu pomoć među zemljama tzv. Istočnog bloka i usklađivanje dugoročnih planova razvoja zemalja članica. Od osnutka 1949. godine, članice su bile: tadašnji SSSR, Bugarska, Mađarska, Poljska, Rumunjska, bivša ČSSR, a kasnije su pristupile Albanija i bivša Demokratska Republika Njemačka. Raspadom komunizma, raspušten je SEV 1991.godine.

– jedinstveni energetski sustav tadašnjeg SSSR, EES[106] SSSR, nastao šezdesetih-sedamdesetih godina prošlog stoljeća, koji je obuhvaćao devet objedinjenih elektroenergetskih sustava u toj zemlji (od ukupno jedanaest, s gotovo 100 rajonskih sustava), u europskom i azijskom dijelu.

Interkonekcija UKTSOA[107] obuhvaća sustav Engleske i Walesa, te koordinira dobavu iz Škotske i uvoz iz Francuske. Konačno, ATSOI[108] je interkonekcija koja obuhvaća sustave Republike Irske i Sjeverne Irske. To su dvije manje europske interkonekcije.

## Nastavak uspostave europskih interkonekcija

Zapadnoeuropske zemlje susprezale su se od dugoročne elektroenergetske ovisnosti o drugoj državi premda unutar iste interkonekcije i iste globalno-političke pripadnosti. Dobava električne energije ne može se operativno nadoknaditi ako susjedi zataje, za razliku od drugih energenata. Ipak, energetsko-ekonomske prednosti snažnije su djelovale od strategijskog opreza: unutar UCPTE godinama je brže rasla međusobna razmjena nego li proizvodnja električne energije. U petnaest godina, od 1975. do 1990. godine proizvodnja se povećala 1,8 puta, vršno opterećenje UCPTE poraslo je 1,6 puta a razmjena se povećala 2,8 puta. Dakle, povećana je proizvodnja uz manje povećanje angažmana elektrana, te uz veliko povećanje razmjene.

Godine 1992. u Pragu je osnovana nova interkonekcija CENTREL[109], kojoj su pristupili elektroenergetski sustavi Češke, Mađarske, Poljske i Slovačke, s jednim od najvažnijih ciljeva: prilagodba mreže radi integracije u UCPTE. Od 1993. godine isključene su veze prema interkonekciji EES bivšeg SSSR. Jugozapadni dio Ukrajine također je odvojen od interkonekcije EES.

Nijemci, u jednoj državi (ponovno ujedinjenoj 3. listopada 1990. godine), žurno su gradili četiri 400-kilovoltna poteza, kako bi nove savezne države izdvojili iz interkonekcije OES i priključili sustavu starih saveznih država, odnosno pridružili interkonekciji UCPTE. To je ostvareno 1995. godine.

Krajem 1995. godine otpočeo je pokusni paralelni rad interkonekcije CENTREL, dakle Poljske, Mađarske, Češke i Slovačke s interkonekcijom UCPTE. Stalni sinkroni rad ostvaren je 1998. godine.

Interkonkcije NORDEL i UKTSOA odjeljuju prema UCPTE-u morske prepreke takve duljine da se ne mogu premostiti primjenom kabela izmjenične struje[110], ekonomičnijom od primjene prijenosa istosmjernom strujom.

Nekoliko podmorskih kabela istosmjerne struje povezuju zemlje NORDEL-a međusobno, a prema UCPTE-u položena su tri takva kabela. Prvi je BALTIC-kabel (danas najdulji podmorski kabel na svijetu: 250 km), između Švedske i Njemačke, napona 450 kV i prijenosne moći 600 MW, od 1994. godine. Drugi je KONTEK-kabel, između Danske i Njemačke, duljine 52 km u Baltičkom moru, napona 400 kV i prijenosne moći 600 MW, u pogonu od 1996. godine. Treći je SwePol-kabel, između Švedske i Poljske, napona 450 kV i prijenosne moći 600 MW, podmorske duljine 230 km, u pogonu od 2003. godine.

[106] Единой енергосистемы (rus.)
[107] United Kingdom Transmission System Operators Association
[108] Association of Transmission System Operators of Ireland
[109] Regional group of transmission system operator companies: ČEPS of the Czech Republic; Hungarian Power System Operator Company-MAVIR of Hungary; PSE-Operator of Poland; Slovenská elektrizačná prenosová sústava-SEPS of the Slovak Republic.
[110] Razlog tomu vidjeti u poglavlju 7.

Najsnažniji podmorski kabelski prijenos na svijetu "IFA 2000", snage 2000 MW, je ispod La Mancha, duljine 72 km. Pri istosmjernom naponu 270 kV omogućuje golemi izvoz iz Francuske u Veliku Britaniju, a u pogonu je od 1986. godine. Već od 1961. godine, na tom potezu je kabelski prijenos istosmjernom strujom prijenosne moći 160 MW.

Godine 1999, usuglašavajući se s odredbama tadašnje Direktive 96/92 Europske Unije o električnoj energiji, koja nalaže tržišni položaj proizvodnje električne energije i odvajanje proizvodnje od prijenosa i distribucije, interkonekcija UCPTE mijenja svoje dotadašnje ime, izostavivši riječ proizvodnja (*production*) iz imena i od tada se naziva UCTE[111], Unija za koordinaciju prijenosa električne energije, i nema više među osnovnim zadaćama koordinaciju proizvodnje električne energije nego pružanje tehničke mogućnosti kao bi se ta koordinacija obavljala na tržišnoj/konkurentnoj osnovi. Udružuje operatore prijenosnih sustava u kontinentalnoj Europi, osiguravajući pouzdanu tržišnu osnovu putem učinkovite i sigurne elektroenergetske mreže najviših napona (*power highway*, kako sami kažu u svome recentnom predstavljanju).

Rat na području bivše Jugoslavije, već 1991. godine razdvojio je – potpunim razaranjem TS 400/110 kV Ernestinovo, te djelomičnim razaranjem TS 400/220/110 kV Konjsko i kasnijim razaranjima na području Bosne i Hercegovine – interkonekciju UCPTE (odnosno, kasnije, UCTE) na dvije zone, svaku za sebe u sinkronom pogonu. U drugoj sinkronoj zoni našli su se elektroenergetski sustavi jugoistočne Europe (istočni dio Bosne i Hercegovine, Srbija i Crna Gora, Makedonija, Grčka, i – u sinkronom radu s drugom zonom od 1994. godine Rumunjska i od 1996. godine Bugarska, te nakon njih i Albanija), a u prvoj sinkronoj zoni sve preostale zemlje, uključujući Hrvatsku i Sloveniju te dio mreže u Bosni i Hercegovini. Za Hrvatsku je od strateškog značaja bila izgradnja 400 kilovoltnog voda Žerjavinec–Heviz, dovršena 1999. godine, jer je to alternativni spojni put Hrvatske prema prvoj zoni UCTE preko Mađarske; obje dotadašnje 400 kilovoltne veze bile su preko Slovenije (Tumbri–Krško i Melina–Divača).

Godine 2004., nakon što su prijenosna mreža u Slavoniji i Baranji i TS 400/110 kV Ernestinovo te mreža u Bosni i Hercegovini obnovljeni, došlo je do rekonekcije prve i druge sinkrone zone UCTE i time je ponovno uspostavljena jedinstvena interkonekcija, od Portugala do Poljske i od Francuske do Grčke, Makedonije, Bugarske i Rumunjske, te – u pridruženom radu – zapadne Danske i jugozapadne Ukrajine. Interkonekcija UCTE obuhvaća, dakle, prijenosne mreže u 22 zemlje[112] i jedna je od najvećih interkonekcija u sinkronom pogonu na svijetu. Slika 8.2. Instalirana snaga elektrana u toj interkonekciji je gotovo 600 gigavata (tisuća megavata), ukupna proizvodnja gotovo 2 500 teravatsati (milijarda kilovatsati), opskrbljujući električnom energijom oko 450 milijuna ljudi (2004). Spojnih vodova 220 i 400 kilovolta, koji povezuju među sobom zemlje u interkonekciji UCTE u pogonu je oko 250!

Grčka se u međuvremenu odlučila na izgradnju dodatne – *politički stabilne* – veze prema UCTE-u, podmorskog kabela istosmjerne struje duljine 163 kilometra na Otrantskim vratima prema Italiji, napona 400 kV i prijenosne moći 500 MW, koji je u pogonu od 2002. godine. Ukupna duljina te veze, uključujući i nadzemne dijelove na oba kopna, je 273 kilometra. Najveća dubina polaganja kabela u more je oko 1 000 metara.

Sjeverna Irska povezana je s mrežom Škotske podmorskim kabelom istosmjerne struje prijenosne moći 500 MW od 2002. godine.

---

[111] Union for Co-ordination of Transmission of Electricity

[112] Austrija, Belgija, Bosna i Hercegovina, Bugarska, Češka, Francuska, Grčka, Hrvatska, Italija, Luksemburg, Mađarska, Makedonija, Nizozemska, Njemačka, Poljska, Portugal, Rumunjska, Slovačka, Slovenija, Srbija i Crna Gora, Španjolska i Švicarska. Uz razdvojenu Srbiju i Crnu Goru, UCTE danas obuhvaća prijenosne mreže u 23 zemlje.

*Slika 8.2. Karta mreže UCTE (01. 07. 2005.)*

# Širenje europskog interkonekcijskog obuhvata

Godine 1991. osnovan je poseban komitet MEDELEC[113] kojem je cilj elektroenergetsko povezivanje oko Mediterana. Izgrađena je veza koja proteže interkonekciju UCTE na sjevernoafrički prostor – države Magreba: Maroko, Alžir i Tunis, koje čine međusobnu interkonekciju. Kabel izmjenične struje napona 400 kV ispod Gibraltara, prijenosne moći 730 MW, duljine 25 km, povezuje Španjolsku s Marokom od 1997. godine. U izgradnji je još jedan takav kabel. Zemlje Mašrega: Libija, Egipat, Jordan, Libanon i Sirija tvore jedan interkonekcijski blok. Pred realizacijom je povezivanje Tunis–Libija. Slijedi povezivanje na tursko-sirijskoj granici. Inače, Bospor je premošten s četiri voda pod naponom 400 kV.

Međukontinentalno povezivanje koje time nastaje, omogućilo bi europsko investiranje u korištenje prirodnim energetskim izvorima sjeverne Afrike, u daljoj budućnosti i dublje u Africi – sve do eventualno mogućih ekonomski prihvatljivih budućih solarnih rješenja masovno instaliranih u ekvatorijalnom području.

Na sjeveru, planirano je polaganje čak tri nova podmorska kabela istosmjerne struje: dva između Norveške i Njemačke, te jedan između Norveške i Nizozemske. Očigledno, komplementarnost skandinavske hidroenergije i sjevernoeuropske kontinentalne termoenergije te ekološki motivi potiču na intenziviranje razmjene između tih prostora. Švedska se time priprema i za nadoknadu termoenergije nakon obustave proizvodnje u vlastitim nuklearnim elektranama.

Danas već funkcionira suradnja unutar baltičkog kruga, među velikim elektroprivrednim poduzećima Finske, Švedske, Njemačke i Danske, a u razmatranju je širenje tog kruga i na: Poljsku, Estoniju, Norvešku, Bjelorusiju, Latviju, Litvu i Rusiju.

U razmatranju je sinkrono povezivanje interkonekcije UCTE i interkonekcije IPS/UPS[114]. Konačni izvještaj o mogućnostima takva povezivanja treba biti podnesen 2008. godine. Interkonekcija IPS/UPS obuhvaća elektroenergetske sustave baltičkih zemalja (Latvije, Litve i Estonije) te Armenije, Azerbejdžana, Bjelorusije, Gruzije, Kazahstana, Kirgistana, Moldavije, Rusije, Tadžikistana, Turkmenistana, Ukrajine i Uzbekistana. Nastala je nakon raspada SSSR-a, odnosno raspada svojedobnog istočnoeuropskog objedinjenog energetskog sustava.

U razmatranju je i alternativa veleprijenosa istok–zapad, sustavom istosmjerne struje s više priključaka (multiterminalni istosmjerni prijenos): Rusija, Bjelorusija, Poljska i dva priključka u Njemačkoj, prijenosne moći 4 000 MW i ukupne duljine 1 800 kilometara.

Pored tehničko-tehnoloških ograničenja širenju, i brojne druge prepreke ne dopuštaju beskrajno protezanje interkonekcijskog obuhvata: neujednačeni pogledi na kvalitetu, sigurnost, ekonomičnost. Različitost tradicija, kultura, jezika, odnosa prema disciplini i slične nehomogenosti unutar preširoko zahvaćenog prostora, također vode nezaobilaznom oprezu.

Najsmionije zamišljen europski projekt je podmorski kabel istosmjerne struje Island–Njemačka, koji projekt *sondira* Hamburg radi osiguranja električne energije iz hidroelektrana i geotermalnih izvora, 1 800 km udaljenog Islanda na Atlantiku. Hidropotencijal i

[113] Mediterranean Liaison Committee of Associations of Electricity Supply Undertakings
[114] IPS/UPS = Interconnected Power Systems/Unified Power System

geotermički potencijal Islanda procjenjuje se na 50 do 60 milijarda kilovatsati godišnje, a Island ima samo oko 250 tisuća stanovnika. Gospodarski zanimljivo za Island a ekološki prihvatljivo i za Island i za Njemačku.

Pri zamišljanju položaja prijenosne mreže Hrvatske za otprilike 20 godina unaprijed, treba je *vidjeti* u dva europska lanca interkonekcijskih povezivanja: kao kariku u istočno-zapadnom europskom elektroenergetskom povezivanju i kao kariku u mediteranskom lancu.

Osim međusobne fizičke povezanosti pojedinih elektroenergetskih sustava – izgradnjom dalekovoda među njima – nužna je i koordinacija u vođenju pogona svih sustava u interkonekciji. Tehnički uređaji koji to omogućuju osnivaju se na mjerenju snage i frekvencije te na prijenosu tih podataka na središnja mjesta njihove obrade i izdavanja regulacijskih naloga. Na činjenici da porast frekvencije u interkonekciji znači debalans u korist generatora, a pad frekvencije debalans u korist potražnje – formira se odgovarajući regulacijski nalog za smanjenje ili povećanje angažmana elektrana.

## Sadašnje stanje interkonekcije UCTE

Sadašnje ukupno stanje u interkonekciji UCTE već je spomenuto. Dodajmo još to da je omjer ukupne instalirane snage elektrana i vršnog opterećenja 1,6 za cijelu UCTE, dakle za 60 posto je veća ukupna snaga elektrana od vršnog opterećenja.

To je karakteristika interkonekcije, jer govori o rezervi u instalaciji elektrana u interkonekciji. Karakteristika potražnje u interkonekciji je omjer ukupne godišnje potrošnje i vršnog opterećenja, tzv. trajanje vršnog opterećenja. Ono za cijelu interkonekciju iznosi u 2005. godini 6 385 sati. U tolikom bi se trajanju plasirala sva stvarno utrošena energija uz nepromijenjeno opterećenje, jednako vršnom opterećenju. Inače, puna godina traje 8 760 sati. Glavni podaci pojedinih zemalja-članica UCTE u 2005. godini izneseni su u tablici 8.1.

Najbitniji podatak koji se odatle može iščitati je taj da se vršno opterećenje interkonkcije UCTE razlikuje za preko 6 000 MW od zbroja vršnih opterećenja pojedinih zemalja, članica interkonekcije. Dakle, toliko bi elektrana bilo potrebno izgraditi, raspoređeno po svim sustavima da nema interkonekcije! U posljednjih 30 godina proizvodnja u interkonekciji UCTE porasla približno tri puta a razmjena je porasla 5,5 puta. Udio razmjene u ukupnoj proizvodnji električne energije povećao se sa šest posto u 1975. godini, na više od 12 posto u 2005. godini. Značajno brže raste prijenos električne energije od proizvodnje, dakle i potrošnje električne energije u interkonekciji. Novi tržišni poticaji, tu će pojavu još više pojačavati. Stoga je iznimno nužna dogradnja prijenosnih mreža unutar regulacijskih područja i spojnih vodova između njih, kako bi se preduhitrila *zagušenja* postojećih prijenosnih putova.

Ukupna razmjena u UCTE-u u jednom smjeru, uvoznom ili izvoznom, tvori veličinu od preko 300 TWh (2005). Stvorena je u posljednje vrijeme, ali i prije posljednjeg vremena, u Europi, elektroenergetska *tržnica* koja se ostvaruje sve življim korištenjem prijenosnom mrežom.

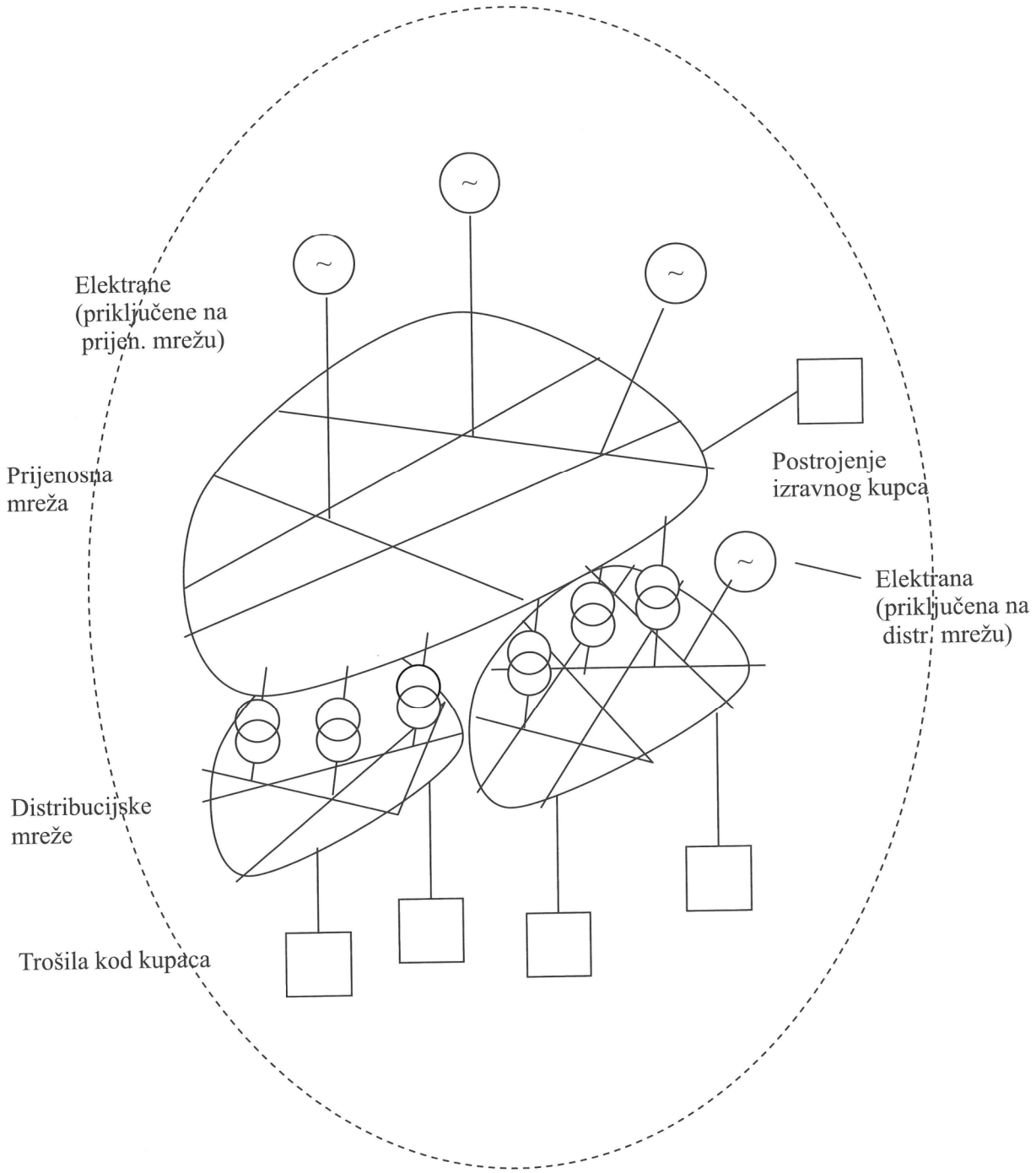
*Tablica 8.1. Interkonekcija UCTE u 2005. godini*

| Zemlja | Ukupna snaga (MW) | Netoproizvodnja (TWh) | Brutopotrošnja (TWh) | Vršno opterećenje (MW) | Uvoz (GWh) | Izvoz (GWh) | Proizvodnja HE/ Netoproizvodnja (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Austrija | 18 270 | 63,8 | 63,2 | 8 904 | 23 088 | 19 773 | 55,6 |
| Bosna i Hercegovina | 4021 | 12,6 | 11,2 | 1 891 | 2 251 | 3 628 | 47,6 |
| Belgija | 16 068 | 82,4 | 86,8 | 13 059 | 14 234 | 8 024 | 1,94 |
| Bugarska | 10 991 | 44,3 | 36,1 | 6 222 | 801 | 8 377 | 10,6 |
| Švicarska | 17 395 | 57,9 | 63,0 | 9 695 | 37 601 | 29 828 | 56,7 |
| Srbija i CG | 9897 | 41,4 | 41,6 | 7 126 | 8563 | 7285 | 33,6 |
| Češka | 16 303 | 76,2 | 62,7 | 9 424 | 12 344 | 24 971 | 3,94 |
| Njemačka | 119 300 | 574,1 | 556,4 | 80 879 | 53 462 | 61 922 | 4,11 |
| Španjolska | 72 762 | 255,8 | 247,9 | 40 972 | 10 201 | 11 124 | 9,23 |
| Francuska | 115 543 | 549,2 | 482,4 | 82 319 | 7 595 | 66 248 | 10,2 |
| Grčka | 11 304 | 50,0 | 52,9 | 8596 | 5 618 | 1 838 | 11,2 |
| Hrvatska | 3 775 | 11,6 | 16,6 | 2810 | 14 638 | 9 286 | 55,2 |
| Mađarska | 8 080 | 33,1 | 39,3 | 6064 | 15 635 | 9 411 | 0,60 |
| Italija | 86 762 | 289,6 | 329,4 | 54 115 | 50 039 | 1 103 | 14,5 |
| Luksemburg | 1 676 | 4,1 | 6,2 | 929 | 2 396 | 798 | 22,0 |
| Makedonija | 1527 | 6,5 | 8,1 | 1450 | 6 400 | 3143 | 23,1 |
| Nizozemska | 2 1977 | 96,4 | 114,7 | 16 597 | 23 693 | 5 400 | 0,00 |
| Poljska | 3 2077 | 144,0 | 130,4 | 21 578 | 5 005 | 16 185 | 2,50 |
| Portugal | 1 2813 | 43,6 | 49,8 | 8 681 | 9 477 | 2 806 | 11,2 |
| Rumunjska | 1 5647 | 54,8 | 51,9 | 7 974 | 1 606 | 4 520 | 36,3 |
| Slovenija | 2 804 | 13,2 | 12,6 | 2 075 | 9 285 | 9 540 | 25,8 |
| Slovačka | 8038 | 29,2 | 26,3 | 4 323 | 8 568 | 11 290 | 15,8 |
| **UCTE** | **607 030** | **2 533,4** | **2 489,0** | **389 835** | **322 500** | **316 500** | **11,6** |
| Zbroj vrš. opterećenja | | | | 395 683 | | | |
| Zap. Danska | 7 556 | 21,9 | 21,3 | 3 527 | 7367 | 7948 | 0,00 |
| Zap. Ukrajina | 2 374 | 8,1 | 4,4 | 978 | 1778 | 5501 | 1,23 |

*Izvor: UCTE-Memo 2005*

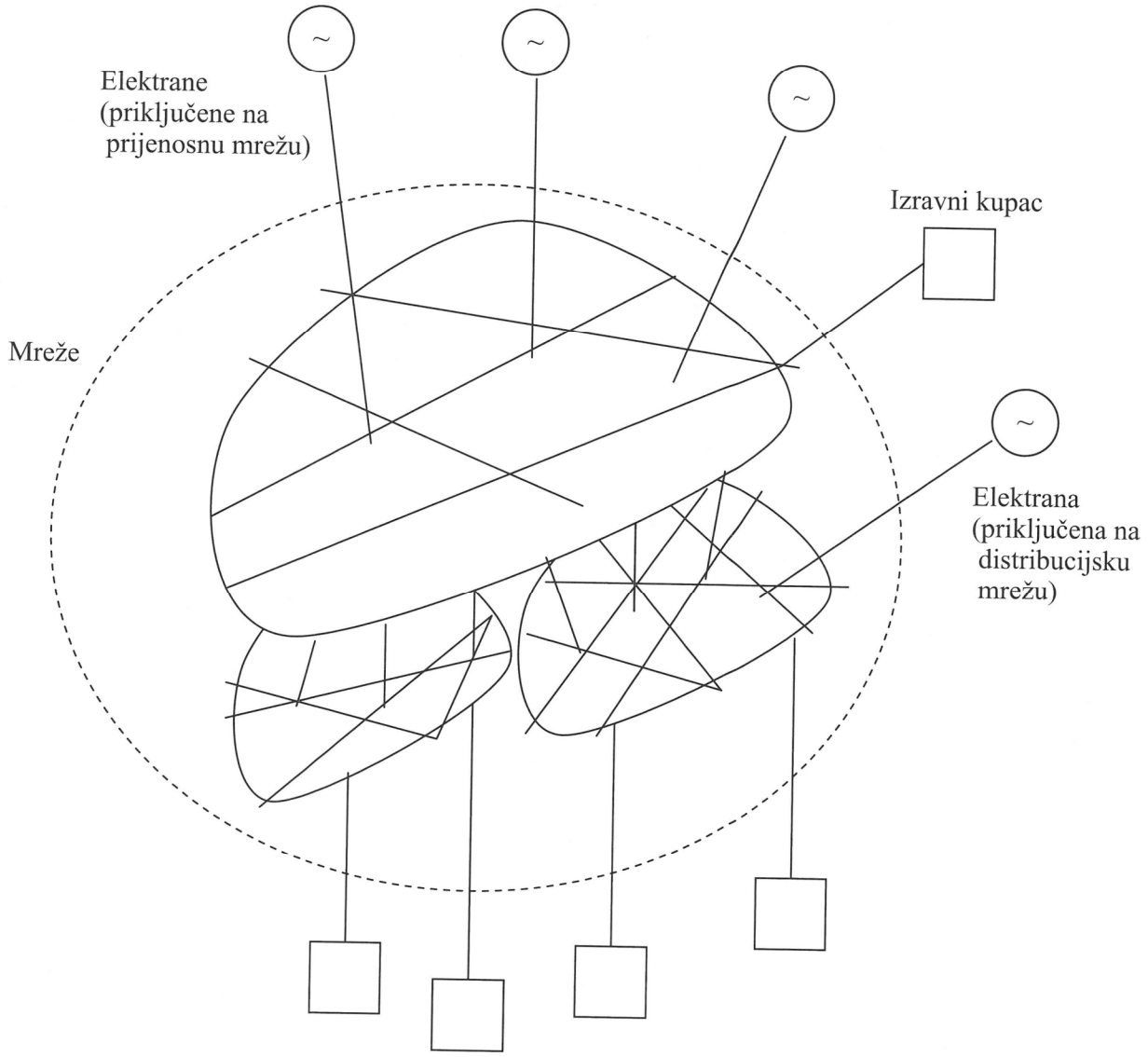
## Zaključno o elektroenergetskom sustavu

U najširem poimanju, elektroenergetski sustav obuhvaća elektrane, prijenosnu i distribucijsku mrežu, te trošila kod potrošača-kupaca (slika 8.3). Pored poznavanja karakteristika elektrana i mreža, egzaktno poznavanje prilika u elektroenergetskom sustavu, zahtijeva i obuhvat karakteristika trošila priključenih na taj sustav (najznačajnije: ovisnost djelatne i jalove snage o naponu i frekvenciji, te ponašanje trošila u slučaju prekida napajanja električnom energijom).




*Slika 8.3. Elektroenergetski sustav*

Elektroenergetski sustav može se promatrati, i često se promatra, suženo: u odnosu na neko zaokruženo geografsko područje, na neke ili neku naponsku razinu ili na neku elektroprivrednu djelatnost. Elektroprivredni dio elektroenergetskog sustava obuhvaća elektrane te prijenosnu i distribucijsku mrežu, a izostavljaju se pri takvu obuhvatu trošila kod potrošača-kupaca. Ponekad se promatra tzv. elektroenergetski sustav u užem poimanju; to je sustav koji obuhvaća samo elektrane i prijenosnu mrežu. Tada govorimo o prijenosnom sustavu. Uže poimanje od toga nije smisleno, prijenosna mreža bez elektrana dakako je *mrtva,* a elektrane nepovezane s prijenosnom mrežom ne bi imale kamo plasirati proizvedenu energiju, a svakako ne bi mogle garantirati nikakvu sigurnost opskrbe. Najčešće se prijenosni sustav ograničava na državno zemljopisno područje. U uobičajenim europskim okolnostima susjedne prijenosne mreže povezane su spojnim vodovima koji omogućuju razmjenu energije među takvim mrežama ili tranzit jednom mrežom za potrebe korisnika izvan te mreže.




*Slika 8.4. Korisnici mreža*

Elektroenergetski sustav čine, dakle:
- elektrane priključene na prijenosnu mrežu
- prijenosna mreža
- distribucijske mreže priključene na prijenosnu mrežu
- elektrane priključene na distribucijsku mrežu
- postrojenja i trošila potrošača-kupaca priključenih izravno na prijenosnu mrežu bez posredovanja distribucijske mreže (izravni ili direktni potrošači-kupci)
- trošila kod potrošača-kupaca priključenih na distribucijsku mrežu.

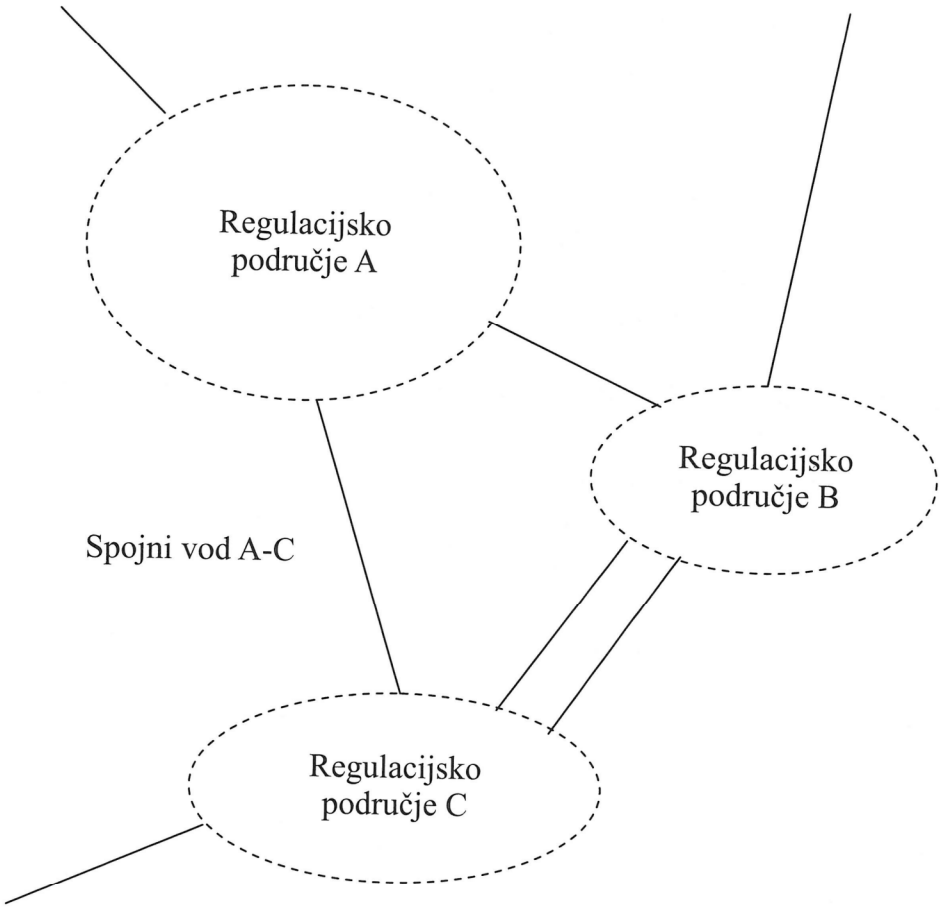
U suvremenom poimanju, elektroenergetski sustav sastoji se od mreža (prijenosne i distribucijske) i korisnika tih mreža, slika 8.4:
- elektrana priključenih na prijenosnu mrežu
- elektrana priključenih na distribucijsku mrežu
- izravno priključenih potrošača-kupaca, dakle, priključenih neposredno na prijenosnu mrežu
- potrošača-kupaca priključenih na distribucijsku mrežu.

Dakako, promatra li se samo prijenosni podsustav, tada su korisnici mreže: elektrane priključene na prijenosnu mrežu, distribucijske mreže priključene na tu prijenosnu mrežu i izravni potrošači-kupci priključeni na tu mrežu.

Elektrane u elektroenergetskom sustavu promatraju se kao proizvodne jedinice; pod jednom proizvodnom jedinicom uzima se kotao, turbina, generator i blok-transformator, dakle, jedan blok konvencionalne termoelektrane. U hidroelektranama izostaje kotao, a u nuklearnim elektranama, umjesto kotla dolazi reaktor. Osnovne jedinice prijenosne i distribucijske mreže, kao što je već rečeno, su: rasklopna postrojenja, vodovi, transformatori i jedinice za kompenzaciju jalove snage.

U normalnim, neporemećenim, prilikama elektroenergetski sustav činile bi sve elektrane u sinkronom pogonu i svi vodovi koji te elektrane međusobno povezuju, praktički u gotovo cijeloj Europi. Tako je i u većem dijelu ostalih kontinenata. Elektroenergetski (pod)sustav na teritoriji pojedine države ili kakva drugog zaokruženog područja, zove se *regulacijsko područje*. Regulacijska područja omeđena su mjernim uređajima kojima se na spojnim vodovima prema susjedima mjeri snaga, radi kontrole *voznog reda* razmjene sa svim susjedima u interkonekciji te automatskog povećanja/smanjenja tekućeg angažmana regulacijskih elektrana u vlastitom regulacijskom području, u slučaju da je smanjen/povećan ukupan *tok snage* u odnosu na vozni red. Vozni red je uobičajen naziv satnog planiranja korištenja nekog voda ili elektrane. Taj se automatski postupak naziva *sekundarna regulacija*. Time elektroenergetski sustav čine zapravo međusobno povezana regulacijska područja unutar cjelokupne interkonekcije (slika 8.5). Nekoliko regulacijskih područja može činiti podskupinu koja prema ostalim regulacijskim područjima čini jednu cjelinu, pa se onda takva skupina naziva *regulacijski blok*.

Sva regulacijska područja, odnosno svi regulacijski blokovi, povezani spojnim vodovima, čine, dakle, interkonekciju. Karakteristično je za interkonekciju apsolutna jednakost pogonske frekvencije u svim njezinim dijelovima. Dakle, u mrežama, primjerice Portugala, Danske i Hrvatske, ista je trenutna pogonska frekvencija, ukoliko nije došlo do raspada elek-



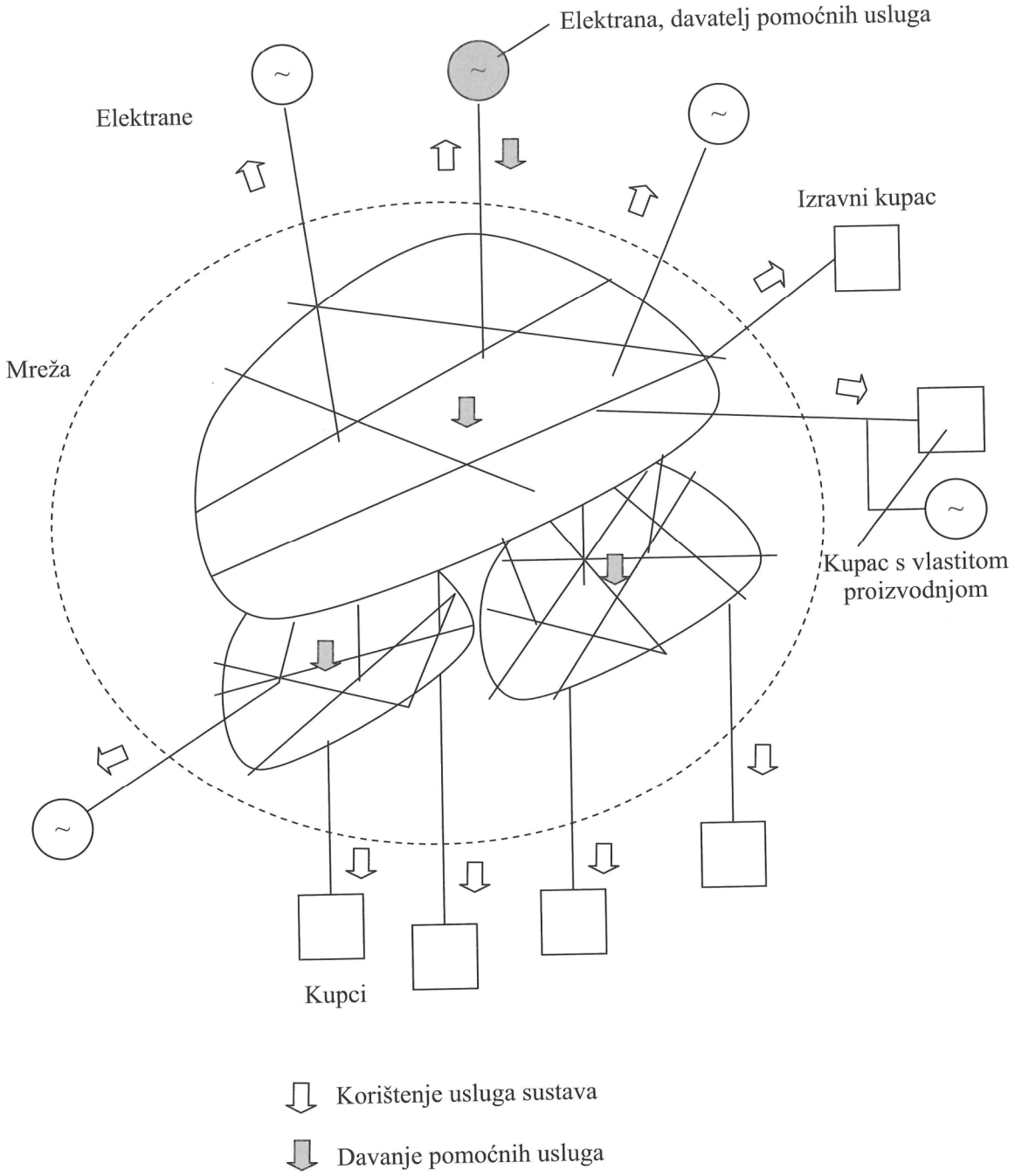

*Slika 8.5. Dio interkonekcije i regulacijska područja*

troenergetskog sustava[115] kada se dijelovi interkonekcije razdvajaju i u tim dijelovima uspostavljaju ponovno zajedničke sinkrone frekvencije, opet jednake u svakom od tih dijelova.

Pored toka djelatne i jalove snage po mreži, odnosno, toka djelatne i jalove energije u nekom razdoblju, teže uočljiv – ali bitan, postoji i tok usluga sustava cjelokupnom povezanom mrežom, slika 8.6. Usluge sustava pružaju se svim korisnicima mreže i bitne su za normalno funkcioniranje elektroenergetskog sustava i za normalno funkcioniranje svakog korisnika mreže. Usluge sustava koriste dakle sve elektrane i svi potrošači-kupci priključeni na prijenosnu ili distribucijsku mrežu. Usluge sustava su:

– vođenje elektroenergetskog sustava
– održavanje frekvencije
– održavanje napona
– ponovna uspostava napajanja.

[115] Posljednji veliki raspad u Europi zbio se 4. studenog 2006. Dijelovi Njemačke, Francuske, Belgije, Italije, Austrije, Španjolske i Maroka bili su i do 2 sata bez električne energije. Nesmotreno planiran, isklop jednog voda 380 kV u njemačkoj mreži kako bi se omogućila plovidba broda ispod tog voda, dovela je do viška snage od 10 000 MW u njezinu sjevernom sektoru i do manjka snage u južnom sektoru, prije svega zbog ispada brojnih vjetroelektrana nakon pada frekvencije u tom sektoru, te do razdvajanja sjevernoeuropskog dijela mreže UCTE od južnog dijela. Tri godine prije tog raspada, 28. rujna 2003, Italija je bila pogođena razdvajanjem svoga sustava od preostale interkonekcije UCTE. Nakon prisilnog otkaza dvaju vodova, prema Francuskoj i Švicarskoj, preostali vodovi bili su preopterećeni i to je izazvalo njihove kaskadne ispade iz pogona. Dijelovi Italije bili su u trajanju između 5 i 18 sati bez električne energije.




*Slika 8.6. Usluge sustava i pomoćne usluge*

Vođenje elektroenergetskog sustava je usluga sustava koja objedinjuje funkcije planiranja pogona, upravljanja i nadzora nad elektroenergetskim sustavom. Vođenje sustava obuhvaća, među ostalim:

- jamčenje kontinuiteta i pouzdanosti napajanja električnom energijom
- koordinaciju proizvodnje, prijenosa i distribucije električne energije
- usklađeno djelovanje prijenosne mreže sa susjednim prijenosnim mrežama
- usklađivanje odstupanja ostvarivane i planirane dobave i potražnje električne energije (djelatne i jalove komponente)
- pružanje usluga sustava.

Održavanje frekvencije je usluga sustava kojom se frekvencija održava u potrebnoj-deklariranoj točnosti. Za održavanje frekvencije elektroenergetskog sustava koristi se primarna regulacija brzine vrtnje agregata, sustav sekundarne regulacije u koji je uključen određeni broj proizvodnih jedinca i sustav tercijarne regulacije u koji je također uključen određeni broj agregata.

Održavanje napona je usluga sustava kojom se održava prihvatljivo naponsko stanje u svim čvorištima mreže. Postiže se izravnavanjem bilance jalove snage u ovisnosti o potražnji jalove snage mreže i trošila.

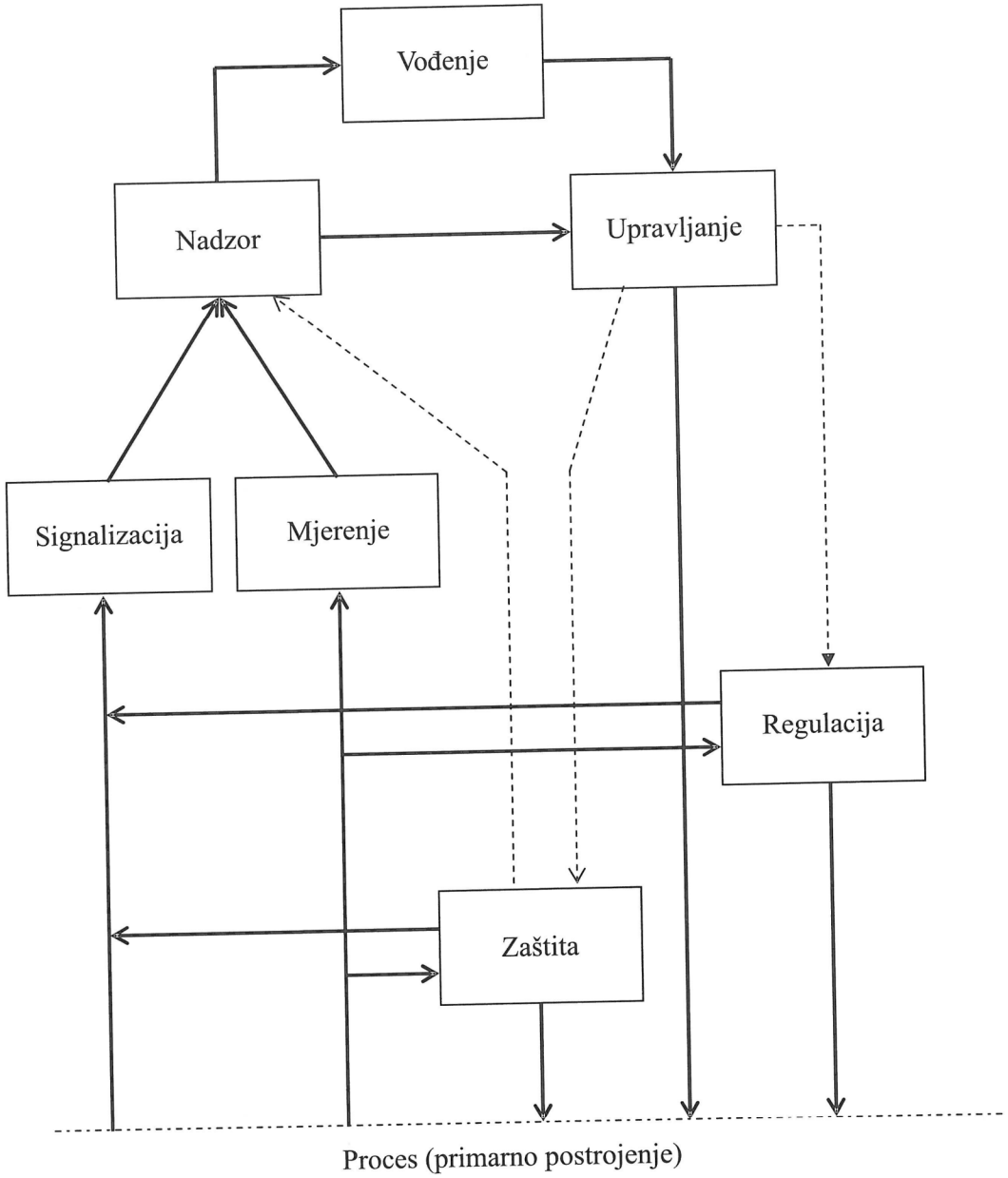
Ponovna uspostava napajanja je usluga sustava koju čini skup tehničkih i organizacijskih mjera za ograničenje poremećaja i za ponovnu uspostavu kvalitetnog napajanja svih korisnika mreže, nakon nastanka poremećaja. U mjere za ponovnu uspostavu napajanja ubrajaju se i pripreme proizvodnih jedinica i mrežnih postrojenja za eventualne velike poremećaje, raspade elektroenergetskog sustava. Raspad je poremećaj u kojem nastupa dioba mreže na najmanje dva dijela, otkazom prijenosnog voda – ili vodova, pri čemu u svakom od tih dijelova, može doći i do prekida napajanja električnom energijom velikih razmjera.

Sve priključene elektrane i svi potrošači-kupci koriste usluge sustava, pa čak i kupac koji ima vlastitu proizvodnju električne energije. Ako je takav kupac priključen na elektroenergetski sustav, i u idealnom slučaju ima apsolutno ujednačenu vlastitu proizvodnju s vlastitom potražnjom električne energije, pa prema tome priključnim vodom prema sustavu ne teče nikakva snaga, u oba moguća smjera, i takav kupac korisnik je usluga sustava. U slučaju iznenadnog zastoja njegove proizvodnje, trenutno će povući iz elektroenergetskog sustava izostalu snagu, a trajno će koristiti i regulaciju frekvencije i napona u čvorištu mreže na koje je priključen.

Usluge sustava pružaju se, dakle, svim korisnicima mreže, a osiguravaju se korištenjem pomoćnim uslugama, koje pak pružaju oni korisnici mreže koji su tehnički podobni i komercijalno zainteresirani za pružanje takvih usluga (opet slika 8.6). Pomoćne usluge također pružaju i same mreže. Primjeri pomoćnih usluga koje mogu pružiti neke elektrane su: učešće u sekundarnoj i tercijarnoj regulaciji, učešće u pokrivanju gubitaka električne energije u mrežama, proizvodnja jalove energije, spremnost za pokretanje iz beznaponskog stanja (*crni start*), sposobnost za pogon na vlastitu potrošnju i sposobnost za otočni pogon. Pomoćne usluge koje pružaju ili mogu pružiti mreže su: vođenje elektroenergetskog sustava, održavanje napona, proizvodnja jelove energije i ponovna uspostava napajanja.

Normalni pogon elektroenergetskog sustava je stanje u kojem je ispunjeno: svi su potrošači-kupci opskrbljeni, sve granične vrijednosti su održane, *kriterij (n–1)*[116] svugdje ispunjen, pa postoje dovoljne rezerve u elektranama i prijenosnoj mreži. To je siguran normalni pogon, a ugrožen normalni pogon nastupa u slučaju kada kriterij (n–1) nije svugdje ispunjen. Granične vrijednosti pojedinih veličina su: dopušteno opterećenje pojedinih jedinica sustava, eventualno dopušteno preopterećenje specificiranoga trajanja te dopuštena odstupanja frekvencije i napona.

[116] Prema kriteriju (n–1) mreža mora ostati bez preopterećenja svih svojih jedinica, dakle u normalnom pogonskom stanju, nakon jednokratnog otkaza (ispada) jedne – bilo koje – raspoložive jedinice mreže. Kriterij (n–1) ispunjen je u prijenosnoj mreži ako, nakon jednokratnog otkaza jednog jednostrukog nadzemnog voda, kabela, mrežnog transformatora, spojnog (interkonekcijskog) voda, kao i generatora priključenog na prijenosnu mrežu, nema sljedećih učinaka (a) trajnog narušavanja graničnih vrijednosti pogonskih veličina u prijenosnoj mreži (napon, frekvencija, dopuštena strujna opteretljivost), koje dovodi u opasnost siguran pogon elektroenergetskog sustava ili uzrokuje oštećenje opreme, odnosno dovodi do neprihvatljivog skraćivanja vijeka trajanja opreme, (b) promjene ili prekida dugoročno ugovorenih prijenosa, (c) prekida napajanja električnom energijom bilo kojeg korisnika mreže i (d) daljnjeg isključivanja jedinica elektroenergetskog sustava, koje nisu izravno zahvaćene tim jednostrukim početnim događajem.




*Slika 8.7. Vođenje elektroenergetskog sustava*

Poremećeni pogon elektroenergetskog sustava označen je stanjem: svi kupci su još opskrbljeni, granične vrijednosti napona i frekvencije nisu više održane, moguća su preopterećenja proizvodnih jedinica i jedinica mreže i kriterij (n–1) nije više ispunjen. Poremećaj je skup iznenadnih događaja i stanja u elektroenergetskom sustavu koji može dovesti do ugroženog normalnog pogona ili poremećenog pogona. Prekid napajanja električnom energijom je izostanak napajanja jednog ili više potrošača-kupaca koji traje dulje od 1,2 sekunde. Prekid napajanja može biti posljedica planiranog ili prisilnog zastoja jedne ili više jedinica elektroenergetskog sustava.

Vođenje elektroenergetskog sustava (slika 8.7) tehnički je omogućeno nadzorom elektroenergetskog sustava i upravljanjem elektroenergetskim sustavom, dakle, davanjem upravljačkih naloga pojedinim jedinicama elektroenergetskog sustava.

Nadzor elektroenergetskog sustava je osiguranje trajnog uvida u stanje procesa koji se zbiva u elektroenergetskom sustavu, dakle, procesa proizvodnje, prijenosa, distribucije i potrošnje električne energije. Nadzor se osigurava prijemom signalizacije (dojave) i mjerenja iz primarnog procesa. Signalizacija (dojava) može biti alarmna i položajna. Alarmna signalizacija ukazuje na nedopušteno ili opasno stanje jedinica sustava koje se nadziru. Položajna signalizacija javlja o položajima nadziranih višepoložajnih (najčešće: dvopoložajnih; uključeno–isključeno) aparata u nadziranom elektroenergetskom sustavu, odnosno mreži. Mjerenja osiguravaju uvid u trenutne ili kumulirane vrijednosti električnih ili neelektričnih veličina u elektroenergetskom sustavu koji se nadzire. Električne veličine koje se mjere su, primjerice: naponi, struje, frekvencija, djelatna i jalova snaga, te djelatna i jalova energija u određenom razdoblju mjerenja. Neelektrične veličine koje se nadziru mogu biti: tlak, temperatura, razine tekućina u procesu (primjerice: razina gornje i donje vode u hidroelektrani ili razina kakve druge značajne tekućine u svome rezervoaru). Nadziru se i reakcije uređaja zaštite na poremećaje.

Upravljanje (komanda, kako ponekad govorimo) je davanje usmenih ili tehnički provedenih (daljinsko upravljanje) upravljačkih naloga za pokretanje elektrane, promjenu opterećenja ili zaustavljanja elektrane, te za uklop ili isklop pojedinih jedinica mreže. Upravljanje čini izvršnu kariku u lancu proces-nadzor-upravljanje. Samo poznavanjem trenutnih i očekivanih prilika u sustavu, što osiguravaju nadzor i planovi rada sustava, omogućeno je utemeljeno upravljanje elektroenergetskim sustavom. Upravlja se i parametrima ugađanja zaštitnih i regulacijskih uređaja.

Posebna, ručna ili automatska funkcija upravljanja elektroenergetskim sustavom je regulacija tog sustava, koja na osnovi izmjerene vrijednosti neke veličine ili izmjerenih vrijednosti nekih veličina, eventualno i nekih prikupljenih signalizacija, daje nalog za promjenu tih veličina na željenu vrijednost. Primjer za regulaciju je regulacijsko davanje naloga regulacijskom transformatoru kojom regulacijom se drži napon na sekundaru tog transformatora u namještenim granicama. Drugi primjer je tzv. sekundarna regulacija koja daje nalog regulacijskim elektranama za promjenu angažmana ovisno o odstupanju voznog reda na spojnim vodovima.

Funkcija koja djeluje isključno automatski je zaštita u elektroenergetskom sustavu. Zaštitni uređaji kontroliraju vrijednosti izabranih veličina iz elektroenergetskog sustava i kada nastupi odstupanje tih veličina veće od namještenoga, zaštita automatski daje nalog za isklop jedinice sustava gdje se to odstupanje manifestiralo. Dakle, postoje zaštite svih jedinica sustava: generatora, transformatora i vodova, koje ograničavaju zastoj pogona na najmanji dio sustava koji sadrži i jedinicu s neispravnošću, a čuvaju pogon ostalih, raspoloživih jedinica sustava i time zadržavaju napajanja električnom energijom što većeg dijela ili čak svih potrošača-kupaca.

Iskustvo pokazuje da je približno 3/4 svih prisilnih zastoja nadzemnih vodova u prijenosnoj mreži u trajanju manje do nešto više od jedne sekunde (primjerice: sušenje izolacijske površine od orošavanja toplinom električnog luka, pad uginule ptice ili životinje s vodiča, sagorijevanje grane drveća ili drugih predmeta koji su se približili faznim vodičima). Zbog toga se zaštita nadzemnih vodova kombinira s uređajem za automatski ponovni uklop koji uz kratkotrajnu beznaponsku pauzu, nakon što je vod ispao iz pogona djelovanjem zaštite, automatski daje nalog za uklop tog voda. Ako je tijekom beznaponske pauze nestalo razloga za isklop voda, automatski ponovni uklop bit će uspješan, a jedan broj potrošača-kupaca neće taj kratkotrajni prekid niti osjetiti, osim moguće po kratkom treptaju svjetla električne rasvjete ili automatskog isključenja elektromotora u kakvu pogonu.

Relevantna stanja promatrane jedinice elektroenergetskog sustava možemo pratiti prema dva, međusobno isprepleteno ovisna, kriterija: prema stanju ispravnosti promatrane jedinice i pogonskom stanju promatrane jedinice. Prema stanju ispravnosti, jedinica može biti ispravna ili neispravna. Prema pogonskom stanju, jedinica može biti u pogonu ili izvan pogona. Sve su zamislive kombinacije tih dvaju aspekata stanja pojedine jedinice moguće: ispravna jedinica – u pogonu, ispravna jedinica – izvan pogona (u zastoju ili u rezervi), neispravna jedinica – u pogonu, te neispravna jedinica – izvan pogona (u zastoju).

Osobito stanje proizvodnih jedinica je u slučaju kada su one spremne za pogon, dakle raspoložive, ali izvan pogona (u rezervi), jer tako uvjetuje potreba njihova angažmana u elektroenergetskom sustavu. Jedinice mreže, ako su raspoložive, u pravilu su u pogonu, jer time povećavaju ukupnu pouzdanost mreže.

Planirani zastoj je izvanpogonsko stanje jedinice sustava koje nastupa nakon planiranog, smišljenog stavljanja izvan pogona te jedinice, a izvodi se povodom:

- potrebnih radova ili zahvata na promatranoj jedinici (unutarnji razlog zastoju)
- potrebnih radova ili zahvata izvan promatrane jedinice, ali koji se mogu obaviti samo uz izvanpogonsko stanje promatrane jedinice (tada je ona u zastoju vanjskim razlogom).

Prisilni zastoj je neplanirano izvanpogonsko stanje jedinice sustava koje slijedi nakon otkaza te jedinice, a uzrokovano je:

- neispravnošću promatrane jedinice (unutarnji razlog zastoju)
- neispravnošću drugih jedinica, ali takvom da je neispravnost tih jedinica uzrokovala (potrebno ili nepotrebno) i izvanpogonsko stanje promatrane jedinice (vanjski razlog zastoju).

Neispravnosti mogu biti prolazne, privremene i trajne. Prolazna neispravnost opisana je naprijed, nestaje nakon kratkotrajne beznaponske pauze, privremene neispravnosti su one koje ne zahtijevaju nikakav zahvat na pogođenoj jedinici da bi jedinica mogla ići ponovno u pogon, a trajne neispravnosti (kvarovi) zahtijevaju popravak ili zamjenu pogođene komponente.

U svim hrvatskim elektranama, 2005. godine, ostvarena je prosječna raspoloživost od 85 posto, dakle 15 posto godišnjeg trajanja bile su – u prosjeku – u remontu, njezi ili kvaru. U oko polovini trajanja raspoloživosti, hidroelektrane su bile u pogonu, a u nešto manje od polovine trajanja raspoloživosti, termoelektrane su bile u pogonu. Najvećim dijelom trajanja neraspoloživosti, elektrane su bile u remontu, u oko 11% godišnjeg trajanja ili 40 dana.

U prijenosnoj mreži Hrvatske elektroprivrede dogodi se posljednjih desetak godina oko 2 700 planiranih (u tome oko polovina unutarnjim razlogom, a polovina vanjskim razlogom) i oko 900 prisilnih zastoja (u tome ispod 1/10 zbog trajne neispravnosti, dakle kvara, a preko 9/10 zbog privremene neispravnosti); ukupno oko 3 600 zastoja godišnje. Dakle, ukupno oko 10 zastoja dnevno. Najviše je planiranih i prisilnih zastoja na kombiniranim nadzemno-kabelskim vodovima (prosječno oko 14 zastoja godišnje po jednom takvom vodu), slijede nadzemni vodovi 110-400 kV (oko 8 zastoja/god. po jednom vodu), transformatori (7 zastoja/god.), kabeli 110 kV (3 zastoja/god.), sklopna polja (ispod 2 zastoja/god.) a najmanje se javljaju zastoji sabirnica (prosječno jedan zastoj u dvije i pol godine). Samo oko 100 zastoja godišnje (u tome najviše prisilnih, a neznatno planiranih) u prijenosnoj mreži Hrvatske izaziva i prekid napajanja električnom energijom, najviše njih u trajanju do 10 minuta, slijede oni koji traju 10 minuta do 1 sat.

# Konačno: kako električna energija dolazi do naše utičnice?

Nalazi li se naša utičnica u stanu na Vijencu Ivana Meštrovića u Osijeku, tada električna energija dolazi do te utičnice na sljedeći način. Vodičima u električnoj instalaciji stana priključena je ta utičnica na razdjelnicu u stanu (uz tu razdjelnicu smješteno je i brojilo za mjerenje utrošene električne energije), a ta razdjelnica povezana je s kabelskim ormarićem u prizemlju zgrade, stubišnim usponskim vodom. Do tog ormarića položen je kabel 0,4 kV koji završava u transformatorskoj stanici 10/0,4 kV, koja se u tom naselju Osijeka naziva KTS-15. Kabelskim podzemnim povezivanjem duž više ulica, kabel 10 kV dolazi konačno u TS 110/10 kV Osijek 3. Ta transformatorska stanica spojena je s prijenosnom mrežom dalekovodima 110 kV, koji u konačnici završavaju u TS 400/110 kV Ernestinovo, a i u elektranama PTE Osijek i TE-TO Osijek (na zajedničkoj lokaciji), koje su dalje vezane također i na TS Ernestinovo. Tu je raspoloživa električna energija iz elektroenergetskog sustava Hrvatske: iz hrvatskih elektrana, kombinirano s dobavom iz inozemstva.

Nije ispravno smatrati osječke elektrane izravno zaslužnim za napajanje naše utičnice. Osječke elektrane plasiraju svoju proizvodnju u elektroenergetski sustav Hrvatske (odnosno, točnije: u hrvatsko regulacijsko područje europske interkonekcije UCTE), ravnopravno sa svim ostalim elektranama koje su priključene na taj sustav, ovisno o trenutnoj ukupnoj potražnji u tom sustavu i proizvodnji tih drugih elektrana. Moguće da ovaj trenutak osječke elektrane nisu niti u pogonu. Međutim, to našu utičnicu *nije briga* (dakako: *nas* to nije briga), ona je u sve vrijeme priključena na sustav koji je – opet – sve vrijeme spreman da je opskrbi električnom energijom.

Sličnu priču mogli bismo ispričati i za milijune drugih utičnica u Hrvatskoj, Europi ili svijetu. Ali ta priča prikazuje samo ono što bi se izravno moglo vidjeti (ili barem pouzdano zamisliti, jer kabelska rješenja u distribuciji sve su *nevidljivija*), međutim moramo se upustiti i u priču o onome što nije vidljivo tako izravno, a bez čega ne bi bilo neprekidnog i sigurnog funkcioniranja elektroenergetskog sustava.

# 9

# Snaga i energija u elektroenergetskom sustavu

U elektroenergetskom sustavu nije dovoljno samo poznavanje električne energije koju u nekom razdoblju treba proizvesti-prenijeti-distribuirati, kako bi se u tom razdoblju zadovoljila potražnja za električnom energijom, nego – istodobno i neraskidivo – nužno je i poznavanje snage, opterećenja tog sustava u svakom trenutku. Drugim riječima: važno je poznavanje snage i njezina trajanja. Dakle, potrebno je poznavanje dinamike potražnje električne energije tijekom vremena: tijekom godinâ, mjeseci, tjedana, dana, sati pa i manjih dijelova sata (uobičajeno: svakih 15 minuta). Zbroj umnoška snage i njezina trajanja – dok se snaga ne promjeni, pa umnoška nove snage i njezina trajanja itd., je energija u nekom razdoblju.

Promatramo li snagu, opterećenje elektroenergetskog sustava u nekom trenutku ili energiju predanu tim sustavom u nekom razdoblju, moramo se najprije odlučiti o razini promatranja. U pogledu teritorijalnog obuhvata, to može biti lokalna razina (primjerice razina jedne TS 10/0,4 kV), nešto viša razina (primjerice razina TS 110/20 kV), državna razina (primjerice: elektroenergetski sustav, odnosno regulacijsko područje Hrvatske), pa i razina čitave interkonekcije (primjerice: UCTE). Nadalje, moramo se odlučiti o *dubinskom* položaju mjesta promatranja u mreži; radi li se o opterećenju na priključnicama generatora, o opterećenju na izlazu iz elektrana ili o opterećenju na nekoj naponskoj razini promatrane mreže. Taj odabir određuje uračunavanje gubitaka u promatrano opterećenje. Primjerice, ako je izabrano mjesto promatranja prijenosna mreža 110 kV, tada će gubici u transformatorima gornjeg napona 110 kV i u svim dijelovima niženaponske mreže biti uključeni u promatrano opterećenje.

Opterećenje može biti ostvareno i planirano. Ostvareno opterećenje prikazuje prilike koje su se doista zbile u nekom ranijem trenutku ili razdoblju, a planirano opterećenje odnosi se na procijenjena očekivanja u nekom budućem trenutku ili razdoblju. Ostvareno opterećenje može se razlikovati od potražnje ako se u promatranom vremenu zbio prekid napajanja električnom energijom. Tada je, naravno, ostvareno opterećenje bilo manje od potražnje upravo za veličinu prekida napajanja. U interkonektiranim elektroenergetskim sustavima prekidi napajanja znaju godišnje imati vrlo malu vrijednost, te je ta razlika između ostvarenog opterećenja i potražnje u pravilu minimalna.

Naglasimo još jednom: opterećenje elektroenergetskog sustava ili dijela elektroenergetskog sustava karakterizirano je snagom u nekom trenutku i energijom predanom u nekom razdoblju.

## Potražnja električne energije

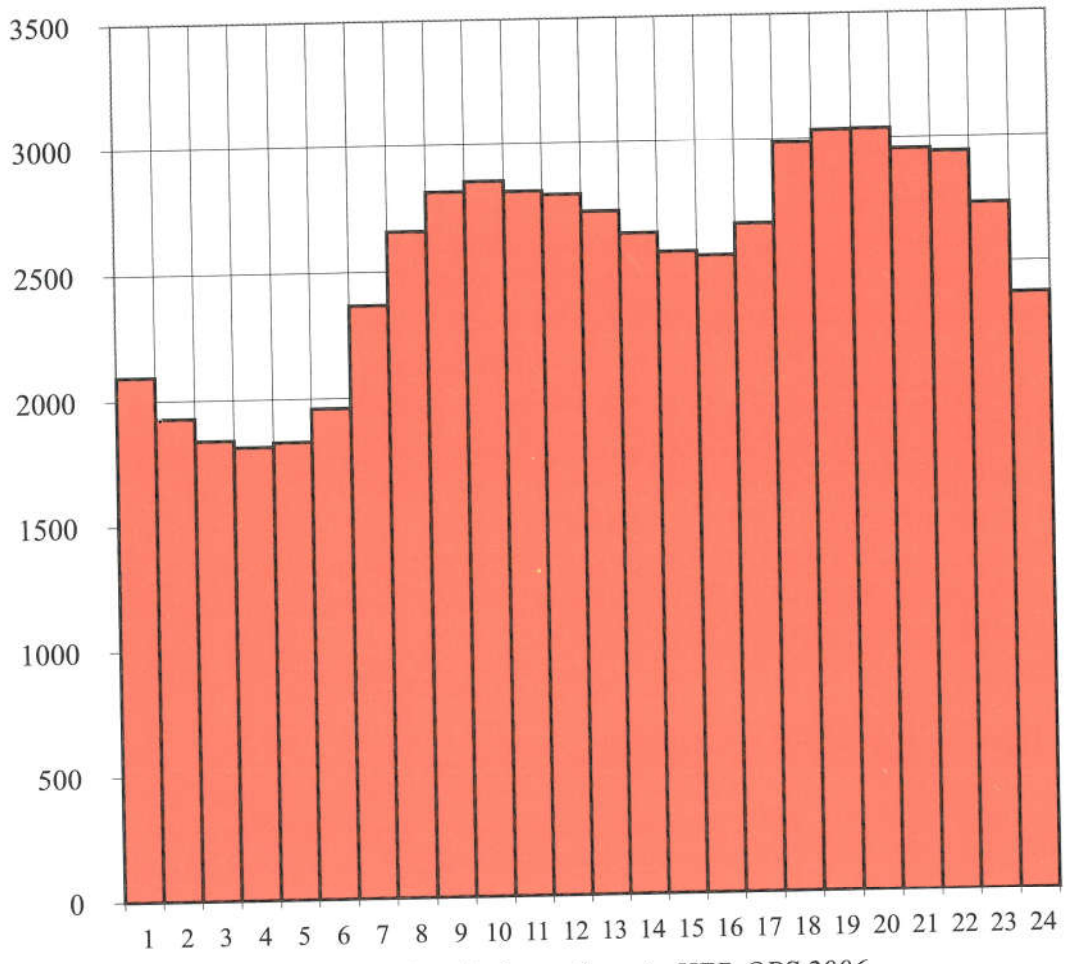
Opterećenje elektroenergetskog sustava ima naglašenu dinamiku, uvjetovanu dakako potražnjom električne energije, koje se opažaju u svakom danu, po danima u tjednu, po mjesecima i višegodišnjem tijeku.

*Dnevnim dijagramom opterećenja* prikazujemo promjenu opterećenja tijekom jednoga dana, dakle u svakom od 24 sata toga dana. Kako se opterećenje mijenja zapravo svake sekunde, uvriježeno je u elektroprivredi promatranje opterećenja u satnom ritmu (ili 15-minutnom ritmu), pri čemu je snaga u svakom pojedinom satu zapravo prosječna snaga u tom satu, koja se dobije dijeljenjem energije isporučene u tom satu s trajanjem od jednog sata.

Ispravno prikazana jedinica u takvu prikazu bila bi zapravo MWh/h, ali mi najčešće pišemo MW. Ploština pod krivuljom dnevnog dijagrama opterećenja predstavlja dakle energiju predanu/primljenu u nekom podrazdoblju ukupnog trajanja, a ukupna ploština za cijeli dan predstavlja energiju predanu/primljenu toga dana.

Na primjeru dnevnog dijagrama opterećenja elektroenergetskog sustava Hrvatske, dana 20. prosinca 2006. godine (slika 9.1) opažamo dnevnu dinamiku opterećenja (potražnje), karakterističnu i za druge elektroenergetske sustave, pa i manje teritorijalne obuhvate. Razlikujemo doba malog opterećenja (u primjeru to je razdoblje između prvog i šestog sata u promatranom danu), te doba višeg opterećenja (u primjeru to je između sedmog i dvadesetčetvrtog sata). Dakle, opaža se ponašanje potražnje sukladno obdanici i noći. Noćna potražnja je, praktički govoreći gotovo stalna (konstantna) dok je potražnja u doba obdanice promjenjiva (varijabilna).

Time i energiju predanu iz elektroenergetskog sustava možemo podijeliti na konstantnu energiju koju je trebalo isporučivati tijekom čitava dana i varijabilnu energiju koju je trebalo isporučivati u kraćim ili duljim razdobljima, ali manjeg trajanja od jednoga dana. U varijabilnom dijelu opažamo brzi rast opterećenja između 7 i 10 sati, počinje novi dan i svekolike

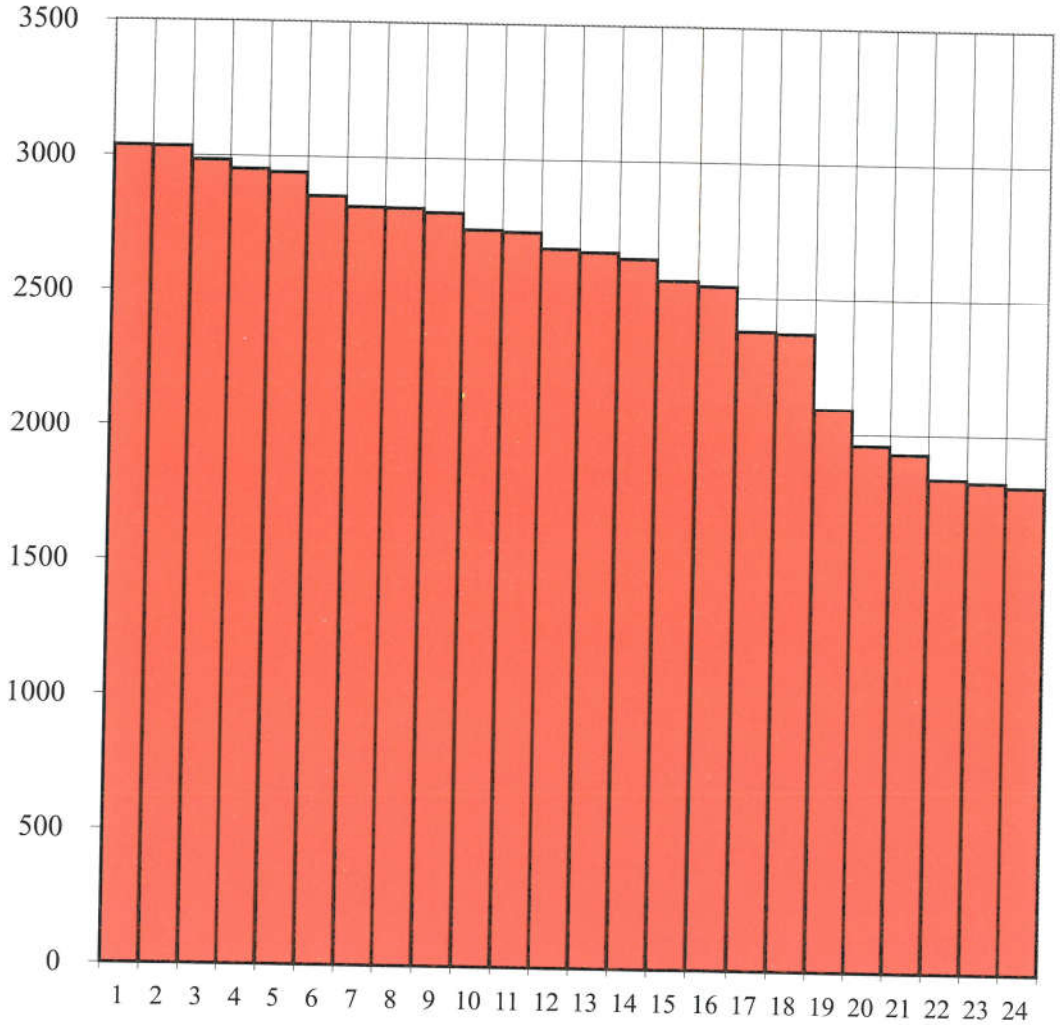



*Izvor: Izvještaj o poslovanju HEP-OPS 2006*

*Slika 9.1. Dnevni dijagram opterećenja elektroenergetskog sustava Hrvatske dana 20.12.2006* (MW)

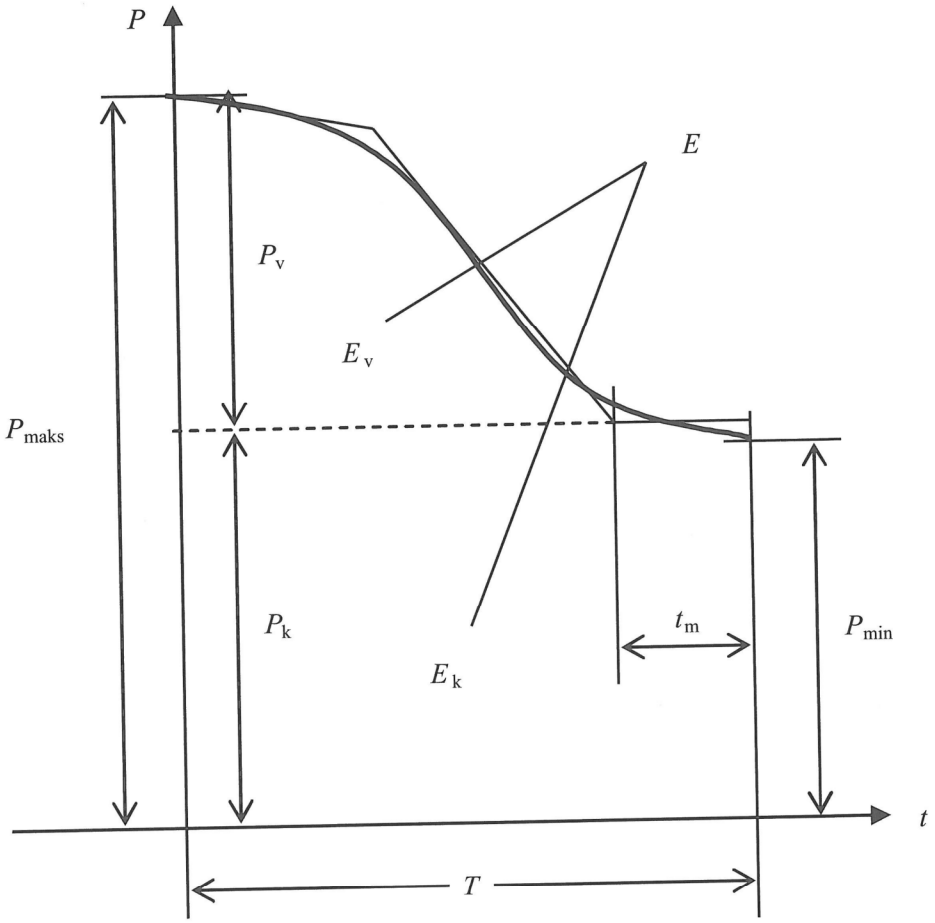
dnevne aktivnosti stanovništva: u kućanstvima, industriji, ustanovama i ostalim djelatnostima. Prijepodnevno vršno opterećenje ostvareno je u 10 sati da bi prema 16 sati postupno blago padalo. Nakon 16 sati ponovno raste, ljudi se vraćaju kućama, posvećuju se kućanskim aktivnostima, a navečer se uključuje i rasvjeta. Večernje vršno opterećenje pojavljuje se u 20 sati i nakon toga naglije opada prema 24. satu kada nastupa noćni smiraj. Ipak, i tada je opterećenje znatno: čine ga aktivnosti koje se ne prekidaju niti noću i javna rasvjeta.

U elektroenergetskim sustavima u kojima je udio potražnje industrije (osobito energetski intenzivne industrije) velik, noćna potražnja je veća nego li u sustavima u kojima prevladava potrošnja kućanstava (kakav je slučaj u Hrvatskoj). U sustavima s velikim udjelom industrije znade biti vršno opterećenje postignuto u dopodnevnim a ne u večernjim satima. Na oblik dnevnog dijagrama opterećenja također utječe početak i završetak obdanice, uobičajeno vrijeme buđenja i odlaska na spavanje stanovništva, dnevni raspored rada tvornica i ustanova, klimatske prilike, navike i životni standard stanovništva, tarifni sustav za prodaju električne energije (koji potiče potrošnju u nekim razdobljima dana, a prigušuje u drugima), korištenje električnom energijom za grijanje i klimatizaciju ... itd.




*Izvor: Izvještaj o poslovanju HEP-OPS 2006*

*Slika 9.2. Dnevni dijagram trajanja opterećenja elektroenergetskog sustava Hrvatske dana 20.12.2006* (MW)




*Slika 9.3. Dijagram trajanja opterećenja i njegovo nadomještanje trima pravcima*

Dnevni dijagram opterećenja karakteriziraju: maksimalno opterećenje ($P_{maks}$), minimalno opterećenje ($P_{min}$), isporučena energija tijekom dana ($E_d$), podijeljena na konstantnu – $E_k$ i varijabilnu energiju – $E_v$, te trajanje malih opterećenja – $t_m$ (u kojem trajanju uzimamo opterećenje približno konstantnim, $P_k$). Iz tih podataka moguće je izračunati dva karakteristična svojstva dnevnog dijagrama opterećenja: faktor opterećenja ($m$) i omjer minimalnog i maksimalnog opterećenja ($m_o$).

Dnevni faktor opterećenja

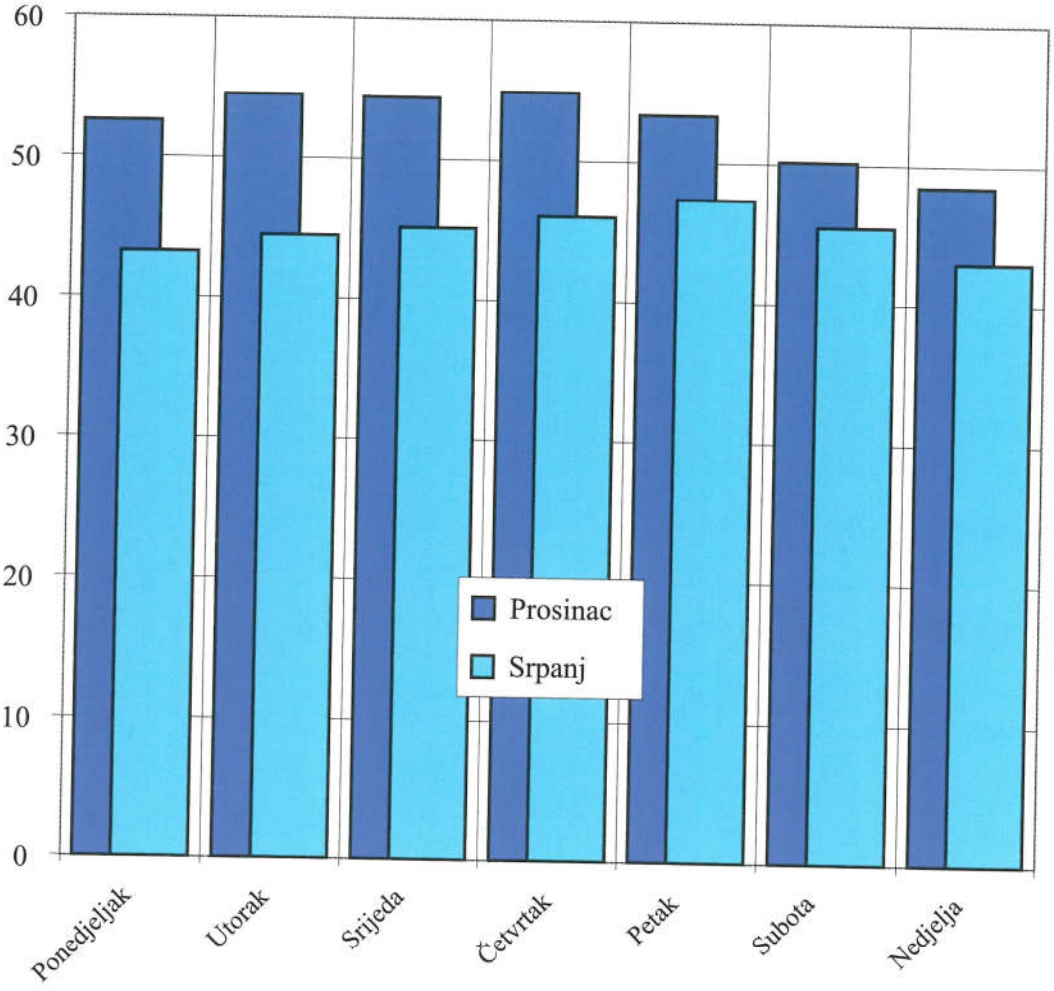
$$m = E_d / (24 \cdot P_{maks}) \tag{9.1}$$

To je zapravo omjer između stvarne dnevne energije $E_d$ i energije koja bi se ostvarila da je opterećenje tijekom svih 24 sata bilo jednako maksimalnom opterećenju $P_{maks}$.

Omjer između minimalnog i maksimalnog opterećenja

$$m_o = P_{min} / P_{maks} \tag{9.2}$$

određuje ukupnu varijabilnost dnevne dinamike opterećenja; što je on veći, razlika između minimalnog i maksimalnog opterećenja je manja. Ako bi taj omjer bio 1 (to je najveći njegov iznos), bilo bi to konstantno opterećenje tijekom cijeloga dana.

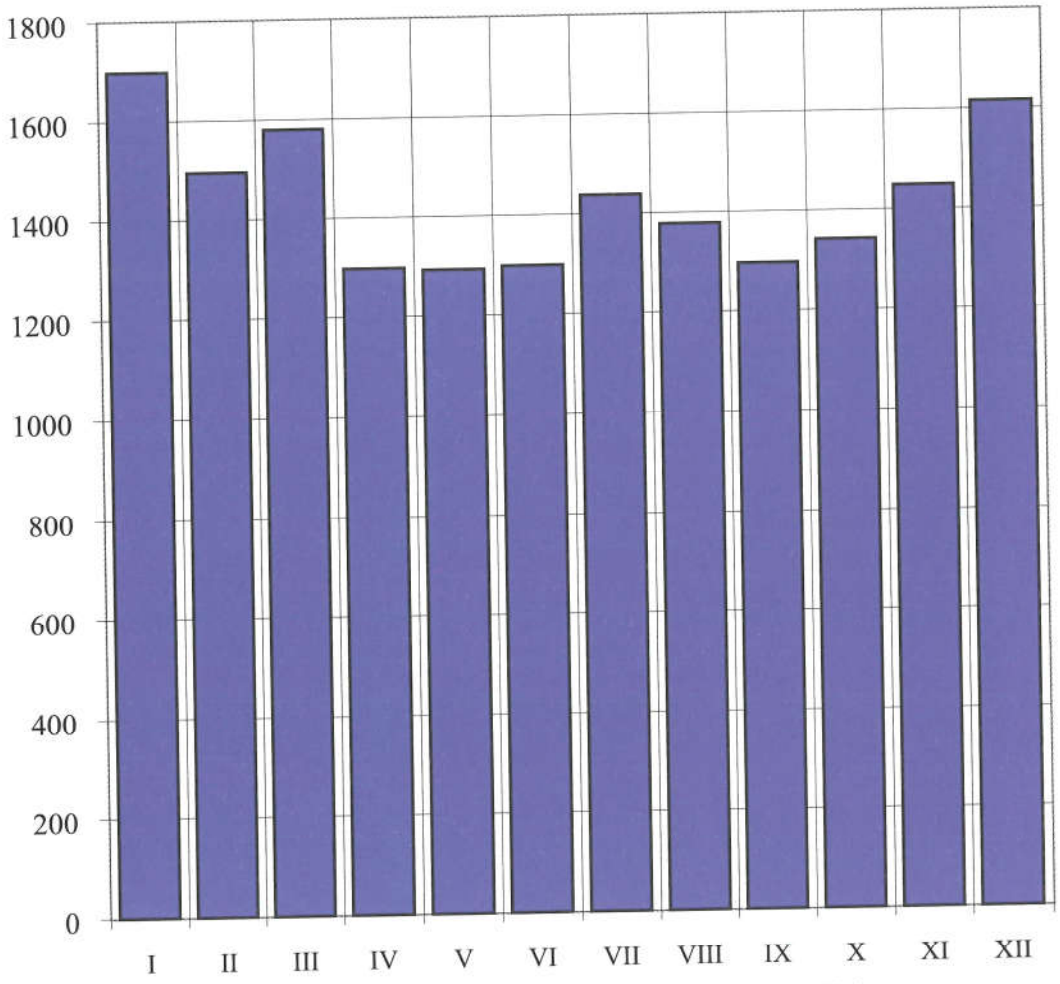



*Izvor: Izvještaj o poslovanju HEP-OPS 2006*

*Slika 9.4. Brutopotrošnja električne energije u elektroenergetskom sustavu Hrvatske po danima u tjednu, u prosincu i srpnju 2006. godine* (GWh)

Za mnoge elektroenergetske analize nije presudno u kojem se točnu satu pojedinog dana dogodilo stanovito opterećenje, nego samo to koliko je bilo i koliko je trajalo pojedino opterećenje u promatranom danu. Takav sređeni dnevni dijagram opterećenja, u padajućem nizu pojedinih opterećenja, naziva se dnevni *dijagram trajanja opterećenja* (slika 9.2). Iz njega se vidi da je minimalno opterećenje $P_{min}$ ili veće trajalo svih 24 sata u jednom danu, a $P_{maks}$ jedan ili najviše samo nekoliko sati toga dana. Sva druga opterećenja trajala su između trajanja tih graničnih opterećenja. Na primjeru dnevnog dijagrama trajanja opterećenja elektroenergetskog sustava Hrvatske, dana 20. 12. 2006. godine vidimo da je maksimalno opterećenje 3 000 MW trajalo približno dva sata, a da je minimalno opterećenje otprilike 1 800 MW. Primjerice, opterećenje 2 500 MW ili veće, trajalo je 16 sati. Dakako, minimalno opterećenje trajalo je svih 24 sata. Često se, radi pojednostavnjenja računskog obuhvata, dnevni dijagram trajanja opterećenja u svome varijabilnom dijelu zamjenjuje kosim silaznim pravcem, kakvom prikladnom krivuljom ili pomoću tri izlomljena pravca (kako je prikazano na slici 9.3).

Dinamika promjene opterećenja opaža se i prilikom promatranja opterećenja u pojedinim danima unutar tjedna, javlja se *tjedna oscilacija potražnje*. Pri tome, razlikuju se radni

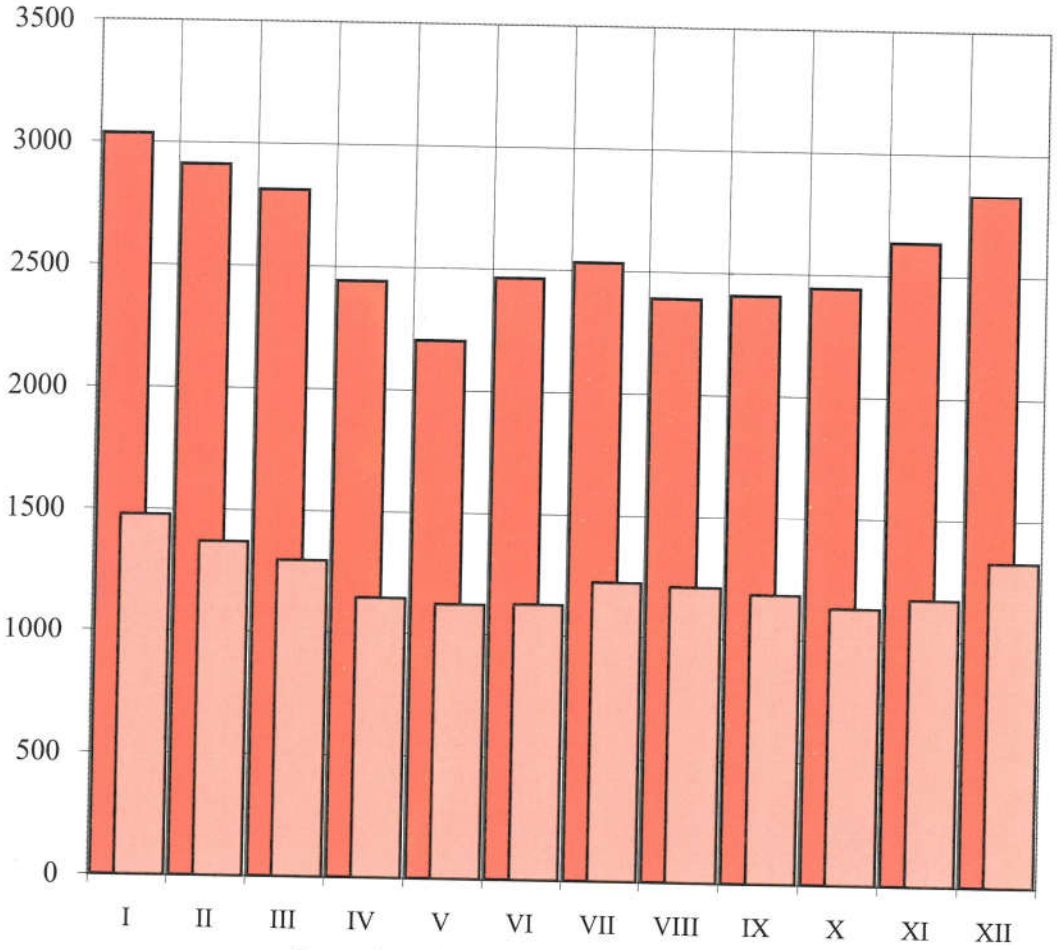



*Izvor: Izvještaj o poslovanju HEP-OPS 2006*

*Slika 9.5. Mjesečna brutopotrošnja električne energije u elektroenergetskom sustavu Hrvatske 2006. godine* (GWh)

od neradnih dana. U radnim danima, do sredine tjedna (ponedjeljak-srijeda) potrošnja blago raste, da bi do kraja radnog tjedna (do petka) blago padala. U neradne dane naglije pada a najmanja je u nedjelju. To je razumljivo, potražnja je sukladna rasporedu tjednih aktivnosti stanovništva i gospodarstva. Razlika između najvećeg tjednog opterećenja (obično srijedom) i nedjeljnog opterećenja nešto je veća u zimskim a manja u ljetnim mjesecima. To što je srijeda dan, u pravilu, s najvećim opterećenjem u tjednu, razlog je što su elektroenergetske prilike u trećoj srijedi svakoga mjeseca izabrane kao reprezentativne za cijeli mjesec kojem pripada ta srijeda. Takav elektroprivredni običaj vrijedi u cijeloj Europi. U primjeru (slika 9.4), potrošnja električne energije po danima u tjednu, treće srijede u prosincu i srpnju u Hrvatskoj 2006. godine, vidimo kako je srijedom u prosincu bila dnevna potrošnja 54 GWh (u četvrtak je bila još nešto viša), a nedjeljom oko 48 GWh. U srpnju dnevne potrošnje bile su manje: u početnom dijelu tjedna oko 45-46 GWh, a u nedjelju oko 43 GWh.

Opažamo, dakle, i *utjecaj sezone na potrošnju (potražnju)* električne energije: u zimskim mjesecima ona je veća, a u ljetnim nešto niža, što najviše ovisi o klimatskim prilikama u pojedinoj zemlji, te o primjeni električne energije za grijanje i klimatizaciju. Za zemlje s blagom klimom karakteristična je nešto slabija dinamika mjesečne potrošnje, a za zemlje

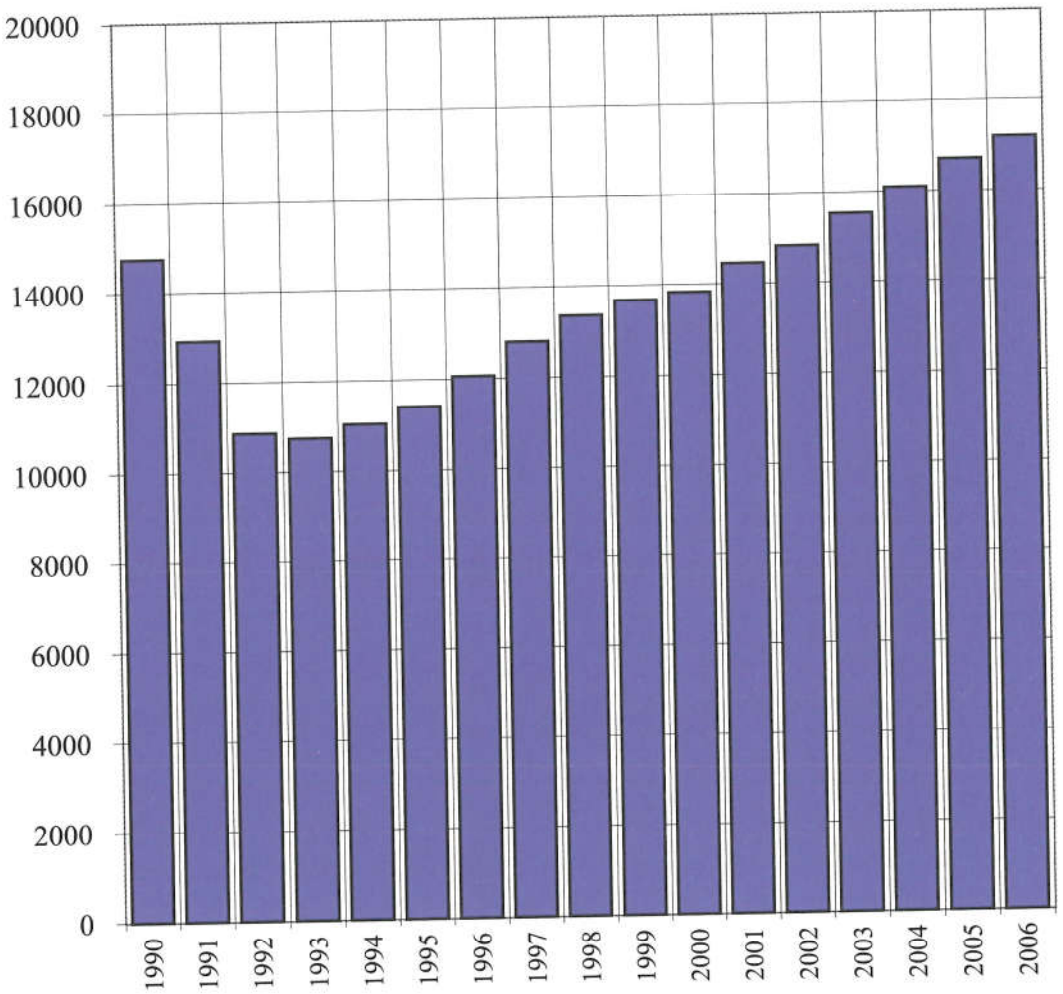



*Izvor: Izvještaj o poslovanju HEP-OPS 2006*

*Slika 9.6. Maksimalno i minimalno mjesečno opterećenje elektroenergetskog sustava Hrvatske 2006. godine* (MW)

s većom razlikom zimskim i ljetnih temperatura, karakteristična je veća razlika između potrošnje u zimskim i potrošnje u ljetnim mjesecima. U zemljama u kojima se električna energija u pravilu ne koristi za grijanje, opet je ta dinamika ublaženija, kao i u onim zemljama u kojima se električna energija naglašeno koristi i za klimatizaciju, što podiže mjesečne potrošnje u ljetnim mjesecima.

Na primjeru rasporeda mjesečne potrošnje elektroenergetskog sustava Hrvatske 2006. godine, slika 9.5, vidimo kako je najveća mjesečna potrošnja ostvarena u siječnju, te da je iznosila oko 1 700 GWh. Najmanja potrošnja ostvarena je u kasno proljeće i ranu jesen kada je ostvarena mjesečna potrošnja oko 1 300 GWh. Utjecaj povećane potražnje klimatizacije i turizma, vidi se u sedmom i osmom mjesecu, kada je ostvarena mjesečna potražnja od prosječno 1 400 GWh. Nastupom kasne jeseni i zime, mjesečne potrošnje rastu, i ovisno o razdoblju najveće hladnoće, ostvaruje se najveća mjesečna potrošnja u prosincu promatrane godine ili u siječnju sljedeće godine. Maksimalno i minimalno mjesečno opterećenje prate donekle mjesečni raspored potrošnje električne energije. Pri tome, maksimalno mjesečno opterećenje ima nešto jaču dinamiku po mjesecima u godini od minimalnog mjesečnog opterećenja. Maksimalno opterećenje u Hrvatskoj 2006. godine ostvareno je u siječnju u iznosu od nešto preko 3 000 MW, a minimalno ostvareno je u kasno-proljetnim mjesecima i iznosilo je oko 1 150 MW (slika 9.6).

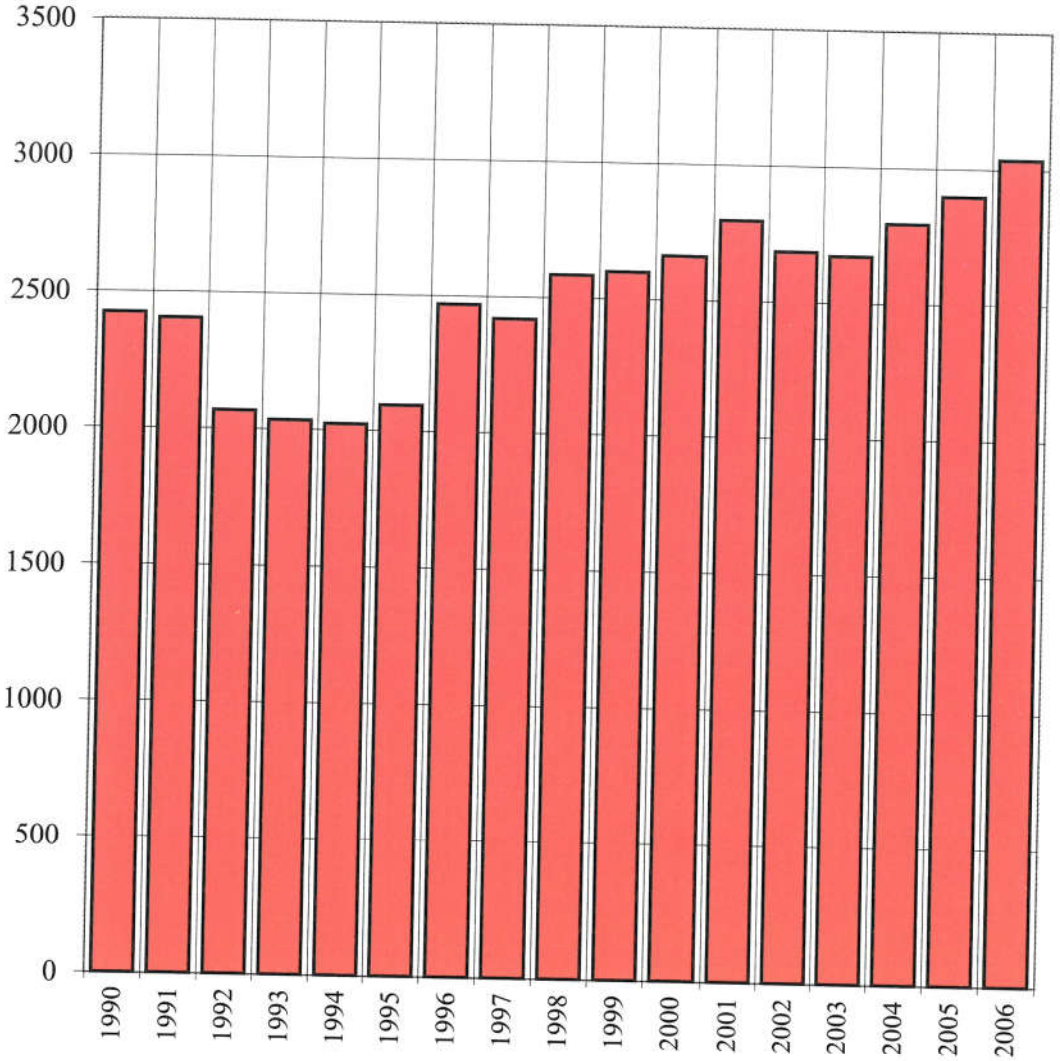



*Izvor: Izvještaj o poslovanju HEP-OPS 2006*

*Slika 9.7. Brutopotrošnja električne energije u Hrvatskoj* (GWh)

Konačno dolazimo i do promatranja porasta potrošnje (potražnje) električne energije i vršnog opterećenja elektroenergetskog sustava *u višegodišnjem tijeku*. Praktički, nezaobilazno pravilo kod toga je da opterećenje i potrošnja električne energije iz godine u godinu uporno rastu. To pravilo nije ispunjeno jedino u slučaju izvanrednih prilika katastrofalnih razmjera, kakve nastupaju u ratu. Najbolje to ilustrira višegodišnje kretanje brutopotrošnje električne energije u Hrvatskoj, u razdoblju 1990.-2006. godine (slika 9.7). Dok je potrošnja 1990. godine bila oko 15 TWh, u naredne dvije godine, zbog ratnih razaranja, pala je na ispod 11 TWh, da bi od 1993. do 2006. godine uporno rasla gotovo linearno. U 2006. godini dosegla je razinu od preko 17 TWh. Prijeratna razina potrošnje ostvarena je 2002. godine, dakle, deset godina elektroenergetskog zaostajanja donijela nam je ratna nesreća. Vršno opterećenje na razini prijenosne mreže 110 kV Hrvatske, malo skokovitije prati tijekom tih godina potrošnju električne energije (slika 9.8). Prije rata, 1990. godine, vršno opterećenje bilo je nešto manje od 2 500 MW, da bi u ratnim godinama palo na oko 2 000 MW. Od tada raste i 2006. godine ostvareno je vršno opterećenje nešto veće od 3 000 MW.

Sedam dnevnih dijagrama opterećenja u jednom tjednu, tridesetak dnevnih dijagrama opterećenja u nekom mjesecu ili 365 dnevnih dijagrama opterećenja u nekoj godini, omogućuju for-




*Izvor: Izvještaj o poslovanju HEP-OPS 2006*

*Slika 9.8. Vršno opterećenje elektroenergetskog sustava Hrvatske* (MW)

miranje dijagrama trajanja opterećenja kojima su vremenske osnovice: tjedan, mjesec ili godina. Za takve dijagrame ponovno se mogu utvrđivati karakteristične veličine koje su spomenute prilikom opisa dnevnog dijagrama opterećenja. Tako, na godišnjoj vremenskoj razini, govorimo o maksimalnom godišnjem opterećenju (ili vršnom opterećenju), minimalnom godišnjem opterećenju, te godišnjoj energiji. Mogu se utvrđivati godišnja konstantna i varijabilna energija, ukupno godišnje trajanje malih opterećenja, godišnji faktor opterećenja, godišnji omjer minimalnog i maksimalnog opterećenja, te konstruirati godišnji dijagram trajanja opterećenja nadomješten trima pravcima. To sve moguće je promatrati i na tjednoj, odnosno mjesečnoj razini.

Za promatranje godišnjih prilika, često se primjenjuje još jedan pokazatelj: godišnje trajanje vršnog opterećenja. To trajanje predstavlja onoliko sati godišnje u kojima bi se uz neprestano vršno opterećenje elektroenergetskog sustava isporučila ukupna godišnja energija, koja je – stvarno – isporučena uz, dakako, raznolika opterećenja: između vršnog i minimalnog. Godišnje trajanje vršnog opterećenja je

$$T_v = E_g / P_{max} \qquad (9.3)$$

Iskazano je u satima, godišnje – h/god. Tu pojedine veličine znače: $E_g$ je godišnja potrošnja električne energije, a $P_{max}$ je godišnje vršno opterećenje elektroenergetskog sustava. Pri tome je trajanje jedne godine 8 760 sati (365 × 24 = 8 760). Usporedbom godišnjeg trajanja vršnog opterećenja i trajanja jedne godine dobiva se dojam o godišnjem iskorištenju elektroenergetskoga sustava. Što je godišnje trajanje vršnog opterećenja bliže trajanju godine, to je iskorištenje sustava veće.

*Tablica 9.1. Godišnje trajanje vršnog opterećenja, 2005*

| Zemlja | Brutopotrošnja (TWh) | Vršno opterećenje (MW) | Trajanje vršnog opterećenja (h/god) |
|---|---|---|---|
| Austrija | 63,2 | 8 904 | 7 098 |
| Nizozemska | 114,7 | 16 597 | 6 911 |
| Njemačka | 556,4 | 80 879 | 6 879 |
| Luksemburg | 6,2 | 929 | 6 674 |
| Češka | 62,7 | 9 424 | 6 653 |
| Belgija | 86,8 | 13 059 | 6 647 |
| Rumunjska | 51,9 | 7 974 | 6 509 |
| Švicarska | 63,0 | 9 695 | 6 498 |
| Mađarska | 39,3 | 6 064 | 6 481 |
| Grčka | 52,9 | 8596 | 6 154 |
| Italija | 329,4 | 54 115 | 6 087 |
| Slovačka | 26,3 | 4 323 | 6 084 |
| Slovenija | 12,6 | 2 075 | 6 072 |
| Španjolska | 247,9 | 40 972 | 6 051 |
| Poljska | 130,4 | 21 578 | 6 043 |
| Bosna i Hercegovina | 11,2 | 1 891 | 5 923 |
| Hrvatska | 16,6 | 2 810 | 5 908 |
| Francuska | 482,4 | 82 319 | 5 860 |
| Srbija i CG | 41,6 | 7 126 | 5 838 |
| Bugarska | 36,1 | 6 222 | 5 802 |
| Portugal | 49,8 | 8 681 | 5 737 |
| Makedonija | 8,1 | 1 450 | 5 586 |
| **UCTE** | **2 489,0** | **389 835** | **6 385** |

*Izvor: UCTE-Memo 2005*

U tablici 9.1. navedena su godišnja trajanja vršnog opterećenja elektroenergetskih sustava zemalja-članica UCTE u 2005. godini.

Karakteristično je za elektroenergetske sustave u zemljama s velikim udjelom kućanstava (utjecaj dan-noć) i turizma (sezonski utjecaj) u ukupnoj potrošnji električne energije, dakle, u sustavima s većom razlikom između vršnog i minimalnog opterećenja, manje godišnje trajanje vršnog opterećenja. U sustavima zemalja s visokim udjelom industrije, omjer vršnog i minimalnog opterećenja je manji, više je konstantne energije, pa je godišnje trajanje vršnog opterećenja veće.

## Namirenje očekivane potražnje

Namirenje očekivane potražnje[117] u nekoj budućoj godini, budućem mjesecu, tjednu ili sljedećem danu u pogledu potrebne energije uz potrebnu snagu zasniva se – za udaljene godine – na dijagramima očekivana trajanja opterećenja, a za bliža razdoblja – osobito sutrašnji dan – na pretpostavljanju očekivanog dnevnog dijagrama opterećenja. Od planera razvoja elektroenergetskog sustava za razdoblje od nekoliko desetljeća do jednog desetljeća ili pet godina unaprijed, do operativnog planera pokrivanja očekivane potražnje u pojedinom satu sutrašnjeg dana, očekuje se predviđanje potreba, sve točnije što je kraće razdoblje za koje se planira. Pri tome, za sve njih najvažnije je poznavanje prilika u prošlosti, dakle dnevnih, tjednih, mjesečnih i višegodišnjih dijagrama opterećenja, odnosno dijagrama trajanja opterećenja i poznavanje utjecajnih čimbenika koji bi djelovali na postupne ili radikalne promjene tih prilika.

Pri dugogodišnjem planiranju to je, primjerice, postupna izmjena gospodarske strukture, rast životnog standarda stanovništva – uopće gospodarski rast, pojava kakva nova velikog potrošača-kupca ili planirani ulazak u pogon ili obustavljanje pogona kakve veće elektrane, a pri planiranju za sutradan to su očekivane vremenske prilike, kakav značajni događaj koji će privući pažnju TV-gledateljstva...

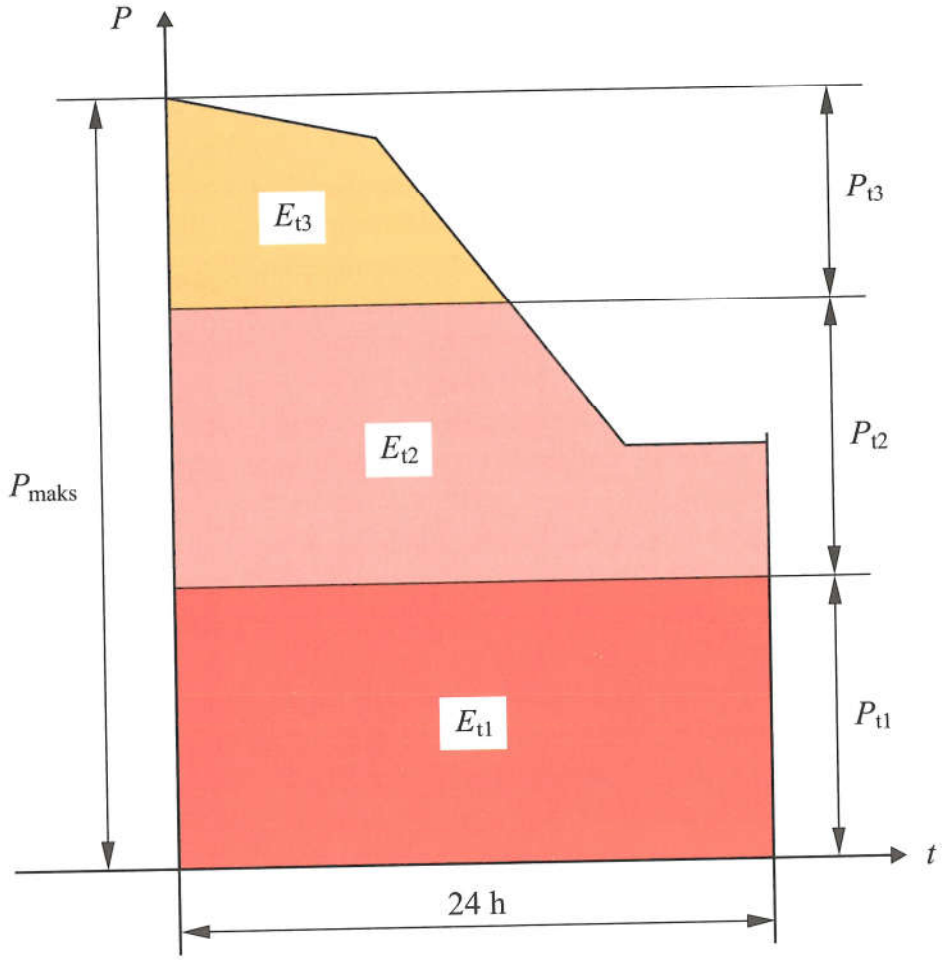
Planiramo li pokriće potražnje u bilo kojem budućem razdoblju, nezaobilazno je vođenje računa o stvarnoj strukturi elektroenergetskog sustava ili dijela sustava za koji se planira, u tom razdoblju. Razlikujemo, teorijski, sustav koji sadrži samo termoelektrane (eventualno i nuklearne elektrane), sustav koji sadrži i znatniji udio hidroelektrana ili općenito elektrana na nestalne izvore energije (vjetroelektrana, sunčanih elektrana), a kod hidroelektrana sustav sa samo protočnim hidroelektranama te sustav s protočnim i akumulacijskim hidroelektranama, te crpno-akumulacijskim hidroelektranama (takav je hrvatski elektroenergetski sustav). Prvi zamislivi sustav je najjednostavniji za planiranje, a posljednji najsloženiji. Razmotrimo planiranje namirenja potražnje električne energije u svakom od nabrojanih sustava. Pri tome nije presudno za koje se buduće razdoblje planira, principi ostaju jednaki – izuzetak čini planiranje korištenja sezonskim akumulacijskim hidroelektranama koje se mogu optimalno koristiti samo sagledavanjem njihova angažmana u više mjeseci a ponekad i više godina.

Potražnju i njezino namirenje moramo bilancirati na istoj mrežnoj razini, primjerice razini priključka elektrana na sustav, jer će tada netopotražnja potrošača-kupaca biti uvećana za gubitke u mrežama i time biti iskazana kao brutopotražnja, a raspoloživa proizvodnja elektrana, umanjena za vlastitu potrošnju električne energije u tim elektranama, dakle kao netoproizvodnja.

[117] Postupak planiranja namirenja očekivane potražnje, najčešće u više različitih varijanata ili scenarija, naziva se *elektroenergetsko bilanciranje*.

## Elektroenergetski sustav termoelektrana

Kako bismo pokrili dijagram trajanja opterećenja (zovemo ga još i dijagram trajanja *potražnje*, kada govorimo o dijagramu trajanja budućeg, još neostvarenog opterećenja), recimo za idući dan, u sustavu koji sadrži samo termoelektrane?[118] Nulti uvjet bi bio raspolaganje dovoljnim količinama goriva za sve termoelektrane. Prvi uvjet bio bi da je zbroj raspoloživih snaga (raspoloživa snaga termoelektrane jednaka je ili manja od instalirane, nazivne, snage jer je elektrana moguće u smanjenoj raspoloživosti zbog dugotrajnijeg nedostatka na kakvom bitnom dijelu, koji još nije otklonjen) veći od očekivanog vršnog opterećenja sustava tog dana. Za rezervu prema neplaniranim zastojima morala bi preostati još rezerva snage termoelektrana, najbolje bi bilo da je rezerva jednaka ili veća od najsnažnije jedinice u sustavu, tako da niti njen iznenadni pojedinačni otkaz neće ugroziti opskrbu.




*Slika 9.9. Smještaj energije termoelektrana u dijagram trajanja opterećenja prema rastućim proizvodnim cijenama*

[118] Ovdje pod termoelektranama razumijevamo sve elektrane na fosilna goriva, kao i elektrane na nekomercijalna goriva, a izneseno gledanje vrijedi i za nuklearne elektrane (ovdje shvaćane kao termoelektrane). Dakle, riječ je o svim elektranama koje mogu proizvoditi električnu energiju u ritmu potreba sustava (dakako, uz osiguranje dovoljnih količina goriva); ipak kod nuklearnih elektrana je najekonomičnije njihovo što ravnomjernije i što više opterećenje.

Sada dolazi pitanje: kojim redom angažirati termoelektrane? Jer, neće sve biti u pogonu tijekom trajanja čitava promatrana razdoblja, dakle primjerice idućeg dana. Čitavo vrijeme bit će angažirane samo elektrane koje će pokriti minimalno opterećenje, dakle raditi u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja, a sve kraća vremena angažiranja ostvarit će elektrane koje će pokrivati varijabilni dio dijagrama opterećenja.

Kako bi se ostvarila najmanja prosječna cijena ukupne proizvodnje električne energije, slijed angažiranja termoelektrana bit će od onih s najnižim proizvodnom cijenom[119] prema onima s najvišom proizvodnom cijenom, slika 9.9. Tada će elektrane s najjeftinijom prozvodnjom (na slici: elektrana raspoložive snage $P_{t1}$) proizvesti najviše energije, a one s najskupljom proizvodnjom (na slici: elektrana raspoložive snage $P_{t3}$) – najmanje energije, i time će konačna prosječna cijena ukupne proizvodnje biti najniža moguća.

U elektranama je najčešće više agregata, te se kod cjelovitog gledanja, ovisno o opterećenju elektrane, bira broj agregata u pogonu, kako bi preostala skupina agregata radila pod najpovoljnijim stupnjem djelovanja radi štednje goriva i – time – najjeftinije proizvodnje (vidjeti sliku 10.1). To isto treba sagledati planiranjem.

Međutim nije to jedino o čemu treba, pri planiranju angažmana termoelektrana, nužno voditi računa. Bitno, doduše nepoželjno, svojstvo svake termoelektrane je tzv. tehnički minimum te elektrane, to je minimalna snaga kojim mora biti opterećena ta elektrana da bi se održala u stabilnu pogonu. Dakle: termoelektrana može biti neopterećena ili opterećena snagom tehničkog minimuma i onda se postupno može povećavati njezino opterećenje sve do raspoložive snage, odnosno do nazivne snage ako je raspoloživa snaga jednaka nazivnoj snazi.

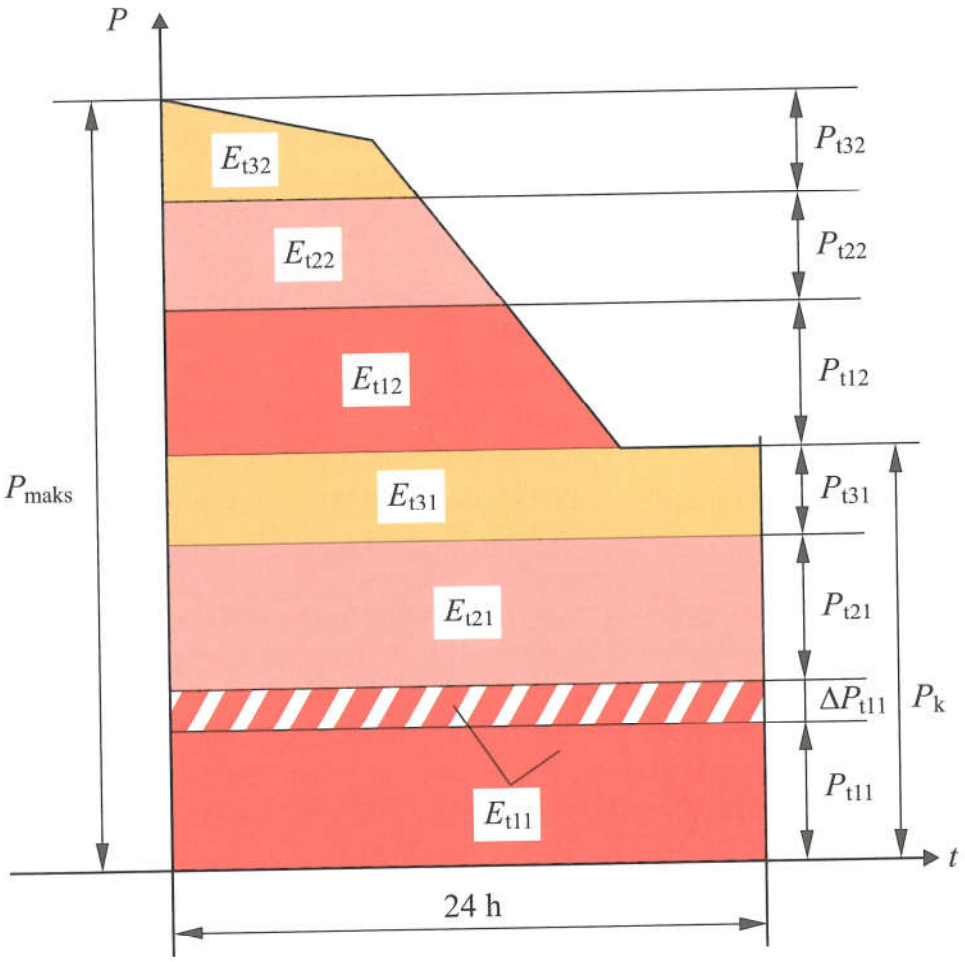
Dakle, kada je odabran angažman određene termoelektrane to mora biti najmanje tehnički minimum. Želimo li da neke ili sve termoelektrane ne obustavljaju rad noću, moramo njihove tehničke minimume smjestiti u konstantni dio dijagrama trajanja opterećenja a preostatak snage u varijabilni dio dijagrama trajanja opterećenja, što će s jedne strane povećati troškove proizvodnje, ali sniziti troškove pokretanja i zaustavljanja elektrana te dugoročno djelovati na povećanje njihova međuremontog razdoblja, odnosno na produljenje njihova vijeka trajanja.

Na slici 9.10 prikazan je jedan mogući primjer smještaja elektrana u dijagram trajanja opterećenja, pri čemu je uvažena potreba da tri elektrane moraju biti u pogonu i potreba da sve tri ne obustavljaju rad noću. Prva brojka u indeksu snage elektrane označuje pripadnost elektrani (rastući broj – rastuća cijena proizvodnje). Druga brojka u indeksu: ako je '1' – znači tehnički minimum te elektrane, a ako je '2' – znači varijabilno opterećenje te elektrane.

Ukupna raspoloživa snaga prve elektrane je barem $P_{t1} = P_{t11} + P_{t12}$ i tako dalje.

Neka je zbroj $P_{t11} + P_{t21} + P_{t31}$ manji od konstantnog opterećenja $P_k$. Tada bismo elektranu s najmanjom proizvodnom cijenom opteretili u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja većim opterećenjem od tehničkog minimuma za $\Delta P_{t11}$, kako bismo proizveli najviše energije uz najmanje troškove. Preostale dvije elektrane opteretili bismo u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja upravo tehničkim minimumima. Varijabilni dio dijagrama opterećenja pokrivali bismo preostalim snagama svake elektrane, do njihove raspoložive snage (a elektranu s najskupljom proizvodnjom vjerojatno nešto niže od toga). Za prvu elektranu, konačno raspoređena njezina raspoloživa snaga bila bi jednaka $P_{t1} = P_{t11} + \Delta P_{t11} + P_{t12}$. Zamislivi su drugačiji primjeri, u sustavu sa samo tri elektrane – a gdje je to od stvarnih prilika u kojima postoje više desetina elektrana; bitno se usložnjava planiranje njihova korištenja!

[119] Precizno govoreći, ovdje bi se gledalo na varijabilne specifične troškove termoelektrana – u kojim bitno najviši udio ima cijena goriva utrošenog za proizvodnju jednog kilovatsata; stalni troškovi postoje, proizvodila elektrana ili ne proizvodila, pa oni nisu mjera za povoljnost angažmana elektrane.




*Slika 9.10. Smještaj tehničkog minimuma termoelektrana u konstantni dio dijagrama trajanja opterećenja*

Dodajmo i to, kako u stvarnim prilikama nije ostvarivo takvo opterećivanje termoelektrana kakvo proizlazi iz tog pojednostavnjenog prikaza. Naime, termoelektrane ne mogu trenutno mijenjati svoje opterećenje, pa stvarne prilike teku po krivuljama a ne po pravcima. Velike termoelektrane trebaju vremena (i preko jedan sat) da postignu puno opterećenje, ako su se pokrenule iz hladnog stanja.

Morat ćemo imati i stanovitu rezervu, u elektrani-ama u pogonu (s agregatima u vrtnji), kako bi ona preuzela opterećenje u trenutku iznenadna otkaza neke druge elektrane ili da pokrije razliku između ostvarenog i planiranog opterećenja u svakom pojedinom trenutku. To ne mora značiti samo moguće povećanje snage rezervne elektrane, može značiti i potrebu smanjenja njezina angažmana, ako je u određenom trenutku očekivana potražnja podbacila.

Također, morat ćemo osigurati godišnja razdoblja, u trajanju oko mjesec dana, za nužni godišnji remont svake termoelektrane, tada neće biti moguć njezin angažman. Planiranje remonata počinje smještajem remonta najsnažnije elektrane u sustavu u razdoblje najmanje potražnje, i tako redom...

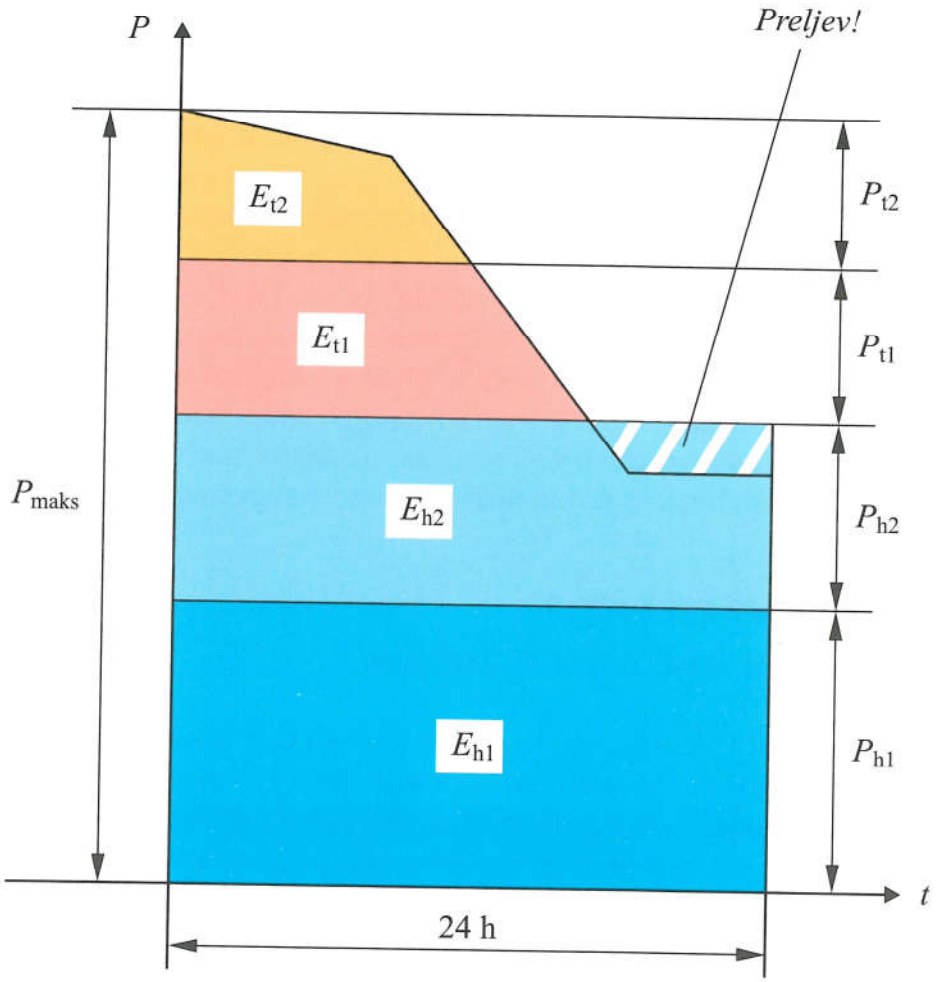
Možda će su komercijalne okolnosti na tržištu biti takve da bi neka elektrana morala biti angažirana, neizravno ovisno o cijeni svoje proizvodnje. Tada će se ona angažirati sukladno tim komercijalnim okolnostima. Moguće da će većina termoelektrana biti angažirana na taj

način, osobito u najnovije doba, kada pojedini opskrbljivači unaprijed otkupljuju proizvodnje pojedinih elektrana i plasiraju ih svojim potrošačima-kupcima. Tada nestaje uopće pojam najpovoljnije prosječne cijene proizvodnje, prosječna cijena proizlazi naprosto iz onih cijena kakve pojedine elektrane postignu na tržištu!

## Sustav termoelektrana i protočnih hidroelektrana

Za protočne hidroelektrane razlikujemo njihovu nazivnu (instaliranu) snagu i njihovu raspoloživu snagu, ovisno o dotoku vode u trenutku promatranja. Ako je dotok vode manji od onoga pri kojem je određena nazivna snaga, raspoloživa snaga bit će odgovarajuće manja. Ako je dotok vode veći od nazivnoga, morat će se dio vode propuštati pored elektrane, jer protočna hidroelektrana nema mogućnost znatnijeg akumuliranja vode.

Raspoloživa snaga protočne hidroelektrane je, dakle, ravnopravna raspoloživoj snazi termoelektrane, jedina bitna razlika je u tome što je raspoloživa snaga protočne hidroelektrane ovisna od tekućih prilika na vodotoku, dok je raspoloživa snaga termoelektrane stalna




*Slika 9.11. Smještaj energije protočnih hidroelektrana i termoelektrana u dijagram trajanja opterećenja*

vrijednost, koja se može promijeniti vrlo rijetko (kada zakaže na dulje vrijeme neki njezin vitalni dio, ali je omogućena – doduše prigušena – proizvodnja). No, za sljedeći dan ili sljedeći sat, znan je dotok vode, pa je time znana i raspoloživa snaga protočne hidroelektrane, odnosno protočnih hidroelektrana.

Kako bismo u tom slučaju *punili* dijagram trajanja opterećenja? Maksimalna snaga potražnje mora biti jednaka ili manja od zbroja raspoloživih snaga termoelektrana i protočnih hidroelektrana. Ako je to ispunjeno, te ako postoji i stanovita rezerva za iznenadni otkaz bilo koje elektrane, kakav ćemo slijed pojedinih elektrana izabrati? Proizvodnja hidroelektrana praktički nema varijabilne troškove, njezino *gorivo* ne košta, stoga ćemo protočne hidroelektrane staviti u donji dio dijagrama trajanja opterećenja, pa tek potom angažirati termoelektrane prema rastućim cijenama njihove proizvodnje, slika 9.11.

Ako je zbroj raspoloživih snaga protočnih hidroelektrana veći od konstantne snage potražnje, doći će i do preljeva u nekoj protočnoj elektrani, pa se ne može sva prispjela voda iskoristiti (što je i prikazano na slici 9.11). Razlikujemo preljev od ispuštanja vode zbog većeg dotoka od onoga što bi ga mogla preraditi elektrana. Preljev nastupa kada bismo vodu koja je dotekla mogli iskoristiti, ali nemamo proizvedenu energiju kome predati. Potražnja je u nekom trenutku manja od moguće proizvodnje u protočnim hidroelektranama.

Ako postoji uvjet da dio ili sve termoelektrane budu angažirane i noću, barem snagom tehničkog minimuma, tada se vjerojatnost preljeva u nekim protočnim hidroelektranama povećava, jer preostaje manje snage u konstantnom dijelu dijagrama trajanja opterećenja koji je raspoloživ za namirenja hidroelektranama. A u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja svakako postoje razdoblja kada neće trebati angažman dijela protočnih hidroelektrana i tako će se ostvariti preljev. Preljeve nastojimo izbjeći, što je moguće više, jer znače izgubljenu energiju koji više nikad ne ćemo moći vratiti, a stalni troškovi hidroelektrane su tu – proizvodila ona li ne proizvodila. Voda nije posve besplatna; naknada za potrošnju vode plaća se razmjerno ostvarenoj netoproizvodnji električne energije, a naknada za korištenje prostorom plaća se lokalnoj zajednici (općinama) na čijem se teritoriju nalazi hidroelektrana[120], također prema neto-proizvedenoj električnoj energiji.

Dodajmo još i to kako je sustav samo protočnih hidroelektrana nezamisliv; u takvom bi se sustavu proizvodila električna energija sukladno dotocima vode i – bez potpore termoelektrana ili spojnim vodovima za uvoz električne energije – sustav bi bio besmislen. Tko bi pristao da ima na raspolaganju onoliko električne energije koliko omogućuje vodostaj u rijekama!?

## Sustav s termoelektranama i akumulacijskim hidroelektranama

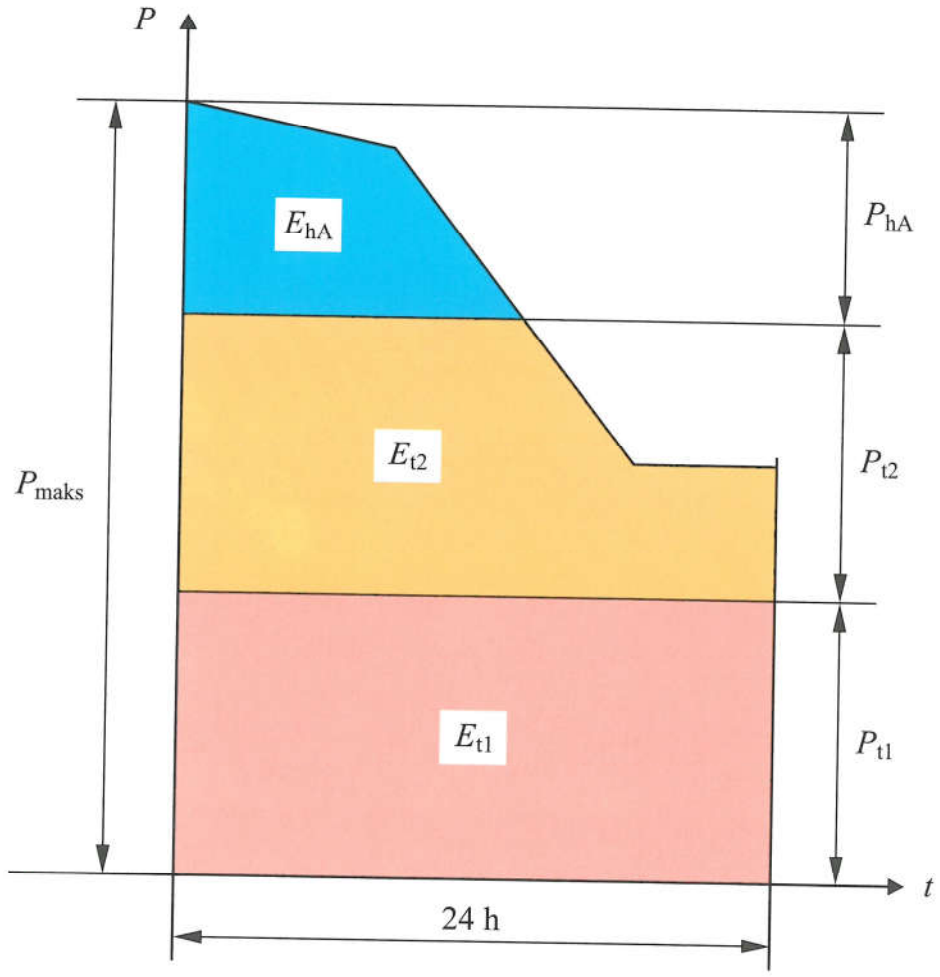
Razmotrimo sada prilike u elektroenergetskom sustavu koji sadrži termoelektrane i samo akumulacijske hidroelektrane. Za akumulacijsku hidroelektranu raspoloživa je snaga upravo jednaka nazivnoj (instaliranoj) snazi, odnosno ona je donekle snižena snaga, jer je gornja kota vode u jezeru to niža što je jezero praznije (što je osobito izraženo kod pribranskih elektrana). To vrijedi u slučaju kada postoji samo jedna akumulacijska hidroelektrana; ako ih je više u lancu, prilike su složenije jer je pražnjenje nizvodnih akumulacija uvjetovano pražnjenjem

[120] Naknadu za korištenje vodom plaćaju sve hidroelektrane u Hrvatskoj. Naknadu za korištenje prostorom plaćaju u Hrvatskoj, pored velikih hidroelektrana (po jednoj tarifi) i male hidroelektrane (po drugoj tarifi), sve termoelektrane, vjetroelektrane snage preko 1 MW, sve geotermalne elektrane, a ne plaćaju elektrane na ostale obnovljive izvore i dizel-električni agregati.

uzvodnih akumulacija. Međutim, postavlja se pitanje: koliko dugo može akumulacijska hidroelektrana raditi punom snagom? Odgovor je jednostavan: dok ne potroši svu vodu iz jezera! Postoji dakle neka energija koju je razumno dnevno iskoristiti proizvodnjom u akumulacijskoj hidroelektrani, kako pražnjenje njezina jezera ne bi bilo niti preveliko niti premalo – upravo toliko koliko se očekuje da će u razdoblju većih kiša ili otapanja snijega biti dopunjeno. Jer, nije dobro koristiti akumulacijsku hidroelektranu niti pretjerano štedljivo – jezero će biti nedovoljno ispražnjeno prije razdoblja povećanih dotoka, pa će se u tako korištenim elektranama morati dogoditi preljev, jer u jezero više neće stati nove vode.

Maksimalna snaga potražnje u sustavu s termoelektranama i akumulacijskim hidroelektranama smije biti najviše jednaka zbroju raspoloživih snaga termoelektrana i raspoloživih snaga akumulacijskih hidroelektrana, ali drugi je uvjet ovdje i taj da ima dovoljno energije (dakle vode u jezeru) raspoložive za proizvodnju u akumulacijskim hidroelektranama kako bi se očuvao dugoročni plan pražnjenja-punjenja njihovih jezera.

To će dovoditi do toga da ćemo morati angažirati termoelektrane više nego što bi se očekivalo, dakle više nego što bi raspoložive snage akumulacijskih hidroelektrana to omogućavale. Smještaj proizvodnje akumulacijskih hidroelektrana bit će pri vrhu dijagrama trajanja opterećenja, kako bi uz što veću snagu ostvarile raspoloživu, odnosno poželjnu proizvodnju, slika 9.12.

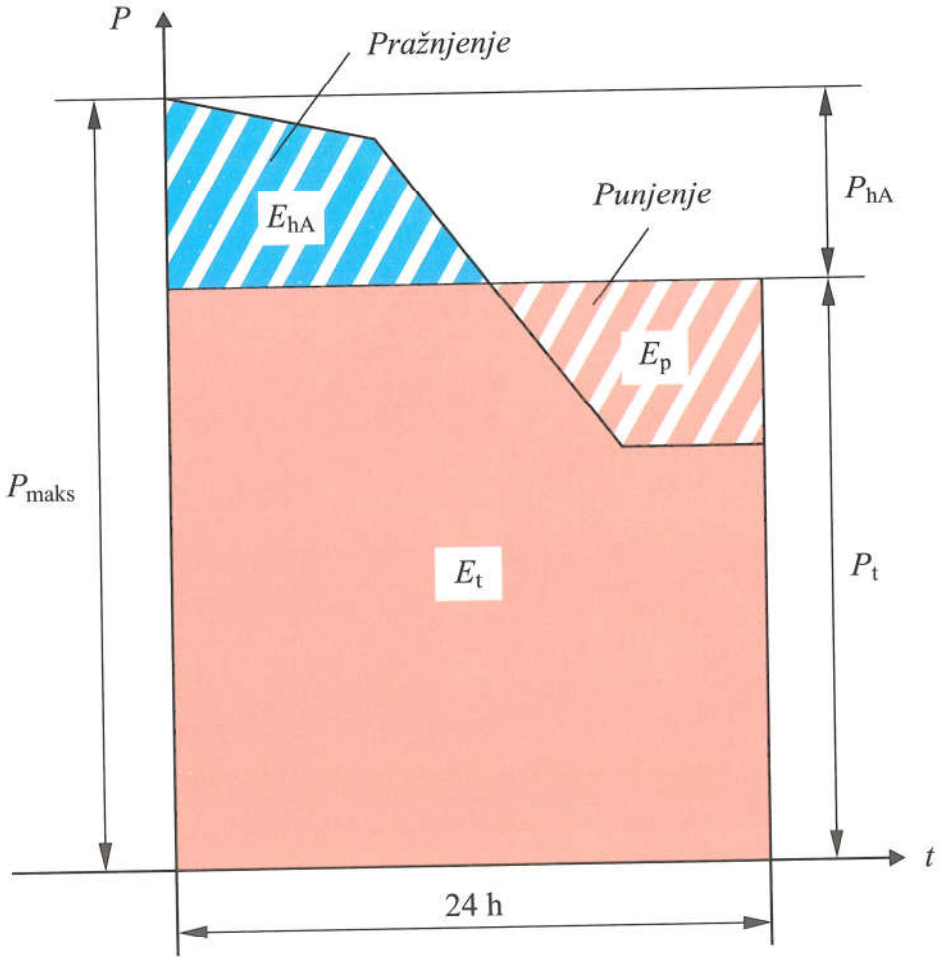



*Slika 9.12. Smještaj energije akumulacijskih hidroelektrana i termoelektrana u dijagram trajanja opterećenja*

Pitamo li se zašto onda uopće graditi akumulacijske hidroelektrane, odgovor je: zato da bitno uštedimo na gradnji termoelektrana. Akumulacijske hidroelektrane izgradit ćemo sa što većom snagom (ali vodeći ipak računa o veličini prirodnog dotoka na profilu elektrane te o skladu mogućeg sadržaja vode u akumulaciji i snazi elektrane, jer ne bi bilo razumno izgraditi toliko veliku snagu da jezero bude ispražnjeno za pretjerano kratko vrijeme), kako bismo time naknadili gradnju što više termoelektrana. Tipični dijagram opterećenja ima naglašen varijabilni dio u koji se dobro smješta relativno manja proizvodnja uz relativno veliku snagu – te je opravdana gradnja akumulacijskih hidroelektrana (ako to uopće omogućuju zatečene topografske prilike na zatečenom državnom teritoriju).

## Sustav s termoelektranama i crpno-akumulacijskim hidroelektranama

To je najfleksibilniji elektroenergetski sustav – omogućuje proizvodnju električne energije i akumulaciju dijela te energije (crpljenjem vode u gornji bazen) u doba kada je potražnja malena, a proizvodnju (korištenje tom crpljenom vodom, pražnjenje gornjeg bazena) u doba kada je potražnja najveća. Naravno, ako postoji dotok vode i u gornji bazen, tada se dio vode koristi




*Slika 9.13. Smještaj energije za punjenje i energije pražnjenja crpno-akumulacijskih hidroelektrana i termoelektrana u dijagram trajanja opterećenja*

na način korištenja u normalnoj akumulacijskoj hidroelektrani. Energiju za crpljenje vode, crpno-akumulacijska elektrana (CAHE) uzima iz mreže, dakle načelno iz povećane proizvodnje termoelektrana, koja bi inače bila manja jer je u pitanju doba dana kada je potražnja najmanja, slika 9.13. Lakše se ispunjava zahtjev da termoelektrane budu opterećene noću barem tehničkim minimumom; dio tog opterećenja *progutat* će crpljenje u crpno-akumulacijskim elektranama.

Naravno, i ovdje se planiranje usložnjava; treba naći mjeru između razdoblja crpljenja – razdoblja crpnog rada CAHE, razdoblja eventualnog mirovanja i razdoblja pražnjenja, dakle turbinskog rada CAHE. Ako postoji i dotok vode u gornji bazen, što je čest slučaj, dopunska briga je pravodobno iskorištenje i te vode.

Crpni rad crpno-akumulacijske hidroelektrane smješta se u donji dio dijagrama trajanja opterećenja (u tom dijelu taj se dijagram zapravo podiže za iznos snage potrebne za crpljenje), a turbinski rad smješta se blizu vrha tog dijagrama, jednako kao što smo utvrdili za *obične* akumulacijske hiodroelektrane. U crpnom radu, takva elektrana je zapravo veliko trošilo električne energije, pa treba pažljivo birati razdoblje takva rada – kada je što jeftinija potrebna proizvodnja za namirenje te potrošnje.

## Osobitosti sustava s termoelektranama-toplanama

Osobitost je termoelektrane-toplane za spojenu proizvodnju električne energije i topline ovisnost proizvodnje električne energije o potražnji toplinske energije (električna energija je *nusproizvod* toplinske energije). Samo u takvu režimu ostvaruje se povoljno iskorištenje goriva, radi čega se termoelektrane-toplane i grade.

Toplinski dio takva postrojenja može opskrbljivati toplinom kućanstva i komunalnu potrošnju, ali može opskrbljivati i industriju ili samo industriju. U slučaju opskrbe toplinom kućanstava (i komunalne potrošnje), potražnja ima znatniju sezonsku oscilaciju: u hladne dane jeseni i proljeća te tijekom čitave zime postoji zahtjev za zagrijavanjem, a u preostalom razdoblju godine nema potražnje za toplinom, osim smanjene – ako toplina služi i za opskrbu toplom sanitarnom vodom, pa je ljetna potražnja bitno manja od zimske. U slučaju opskrbe industrije toplinom, varijacije su znatno manje – industrija treba za svoje toplinske procese toplinu i ljeti.

Kako smjestiti termoelektranu-toplanu u dijagram trajanja opterećenja električne energije? Pa u najdonji predio konstantnog dijela dijagrama opterećenja i u odgovarajući dio varijabilnog predjela dijagrama opterećenja, kako bi se sigurno sva proizvedena električna energija plasirala u elektroenergetski sustav. Regulacijske konvencionalne termoelektrane ili akumulacijske hidroelektrane dizat će ili spuštati svoju proizvodnju u ritmu potražnje električne energije, odnosno suprotno od ritma potražnje toplinske energije. Kada potražnja topline poraste, porast će i proizvodnja električne energije iz termoclektrana-toplana, pa će regulacijske elektrane smanjiti svoju proizvodnju.

Proizvodnja električne i toplinske energije u spojenom procesu naziva se *kogeneracija* i u nizu država se promiče radi visokog iskorištenja goriva. Čak svi potrošači-kupci električne energije sudjeluju u dijelu naknade što je primaju takve termoelektrane-toplane za proizvedenu električnu energiju, bez obzira na to da li ti kupci koriste toplinu ili ne, jer je ušteda goriva u općem nacionalnom interesu. Električni dio takve termoelektrane-toplane radi uz niži stupanj djelovanja od moderne konvencionalne termoelektrane (pa je stoga proizvodnja električne energije u termoelektrani-toplani nešto skuplja), ali takva termoelektrana-toplana proizvede i toplinu za toplinske potrošače-kupce, a konvencionalna termoelektrana grije okolinu.

## Potrebna snaga termoelektrana u sustavu koji sadrži elektrane na nestalne prirodne izvore energije

Uočili smo bitnu razliku između termoelektrana i hidroelektrana u pogledu njihova maksimalnog angažmana. Termoelektrana može raditi punom raspoloživom snagom sve dok je raspoloživo gorivo u dovoljnim količinama. TE-TO (glede proizvodnje električne energije) radi u ritmu potražnje toplinske energije. Protočna HE može raditi onom snagom koju omogućuje tekući dotok, akumulacijske HE i CAHE mogu raditi raspoloživom snagom ali proizvodeći ograničenu količinu električne energije pri tome. Gledanje na hidroelektrane možemo proširiti i na sve one elektrane koje rade na nestalni, promjenjivi prirodni izvor energije (vjetar i Sunčevo zračenje).

Elektrane na biomasu i otpad te na bioplin (tzv. nekomercijalna goriva) i geotermalne elektrane „normalne" su termoelektrane, prema načinu korištenja, pa je gledanje na njih jednako onome koje smo iznijeli za termoelektrane. Eventualno će preuzimanje energije iz njih biti favorizirano državnim zakonodavstvom, no i tada se načelno njihovo korištenje neće bitno razlikovati od opisanog za konvencionalne termoelektrane pa i nuklearne elektrane. Za nuklearne elektrane bit će uvjet da što dulje rade – praktički cijele godine, osim u razdoblju njihova remonta – u konstantnom dijelu dijagrama trajanja opterećenja, jer je tada njihovo korištenje najekonomičnije, rade s najboljim stupnjem iskorištenja goriva.

Međutim, hidroelektrane i ostale elektrane na nestalne prirodne izvore energije (Sunce, vjetar) praktički nemaju varijabilne troškove, nego samo stalne troškove. Stajale one ili proizvodile, načelno će izazvati isti godišnji trošak. Stalni troškovi će pri tome biti vrlo različiti za te elektrane, ovisno o brojnim utjecajnim čimbenicima, ali po jedinici proizvedene električne energije bit će to manji što je ostvarena proizvodnja veća. To je prvi razlog da će ih se nastojati koristiti što je moguće više, praktički onoliko koliko omogući dotok nestalnog izvora prirodnog oblika energije. Drugi razlog za takvo njihovo korištenje je ušteda goriva u termoelektranama. Opet su zakonodavne prilike te koje eventualno nalažu obvezu preuzimanja njihove proizvodnje (hidroelektrana, vjetroelektrana i sunčanih elektrana) u veličini i ritmu njihova prirodnog dotoka.

Iz dosadašnjeg izlaganja razumjeli smo kako bi elektroenergetski sustav koji bi sadržavao samo elektrane na nestalne izvore energije bio neprihvatljiv jer ne bi mogao jamčiti sigurnost opskrbe električnom energijom. Realni sustav treba biti izgrađen za smišljenu kooperaciju elektrana na stalne i nestalne izvore energije.

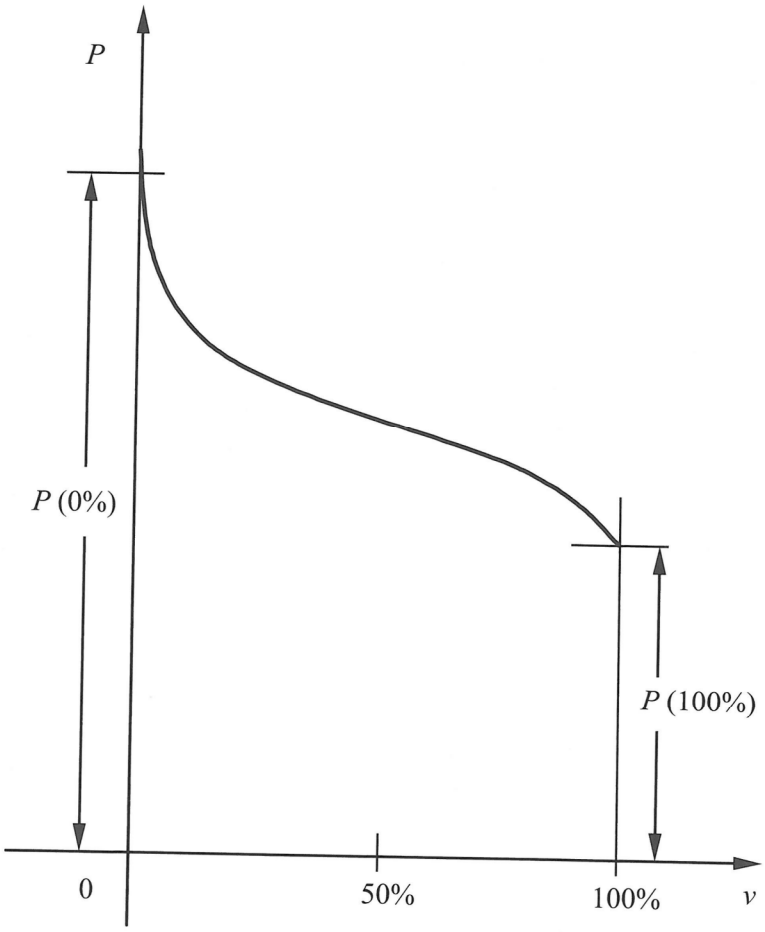
Dakle, glavno pitanje je – za jedan elektroenergetski sustav koji sadrži termoelektrane (uključivo i nuklearne elektrane, geotermalne, elektrane na biomasu i otpad te na bioplin) i elektrane na nestalne prirodne izvore energije – koliko treba uopće izgraditi termoelektrana u sustavu, kako bi se zadovoljila potražnja s poželjnom sigurnošću? Ne bi bilo razumno izgraditi sustav sa stopostotnom sigurnošću jer bi bio preskup. Jeftiniji je sustav s nešto manjom sigurnošću, pa onda ako se doista steknu uvjeti za ugrožavanje sigurnosti – posegnuti za uvozom ili čak posegnuti za smišljenom redukcijom potražnje najmanje osjetljivih ili čak unaprijed izabranih velikih potrošača-kupaca i tako riješiti nastale prilike, koje ionako neće dugo potrajati (dijagram trajanja opterećenja tipično pokazuje kako vršno opterećenje traje vrlo kratko).

Kako pristupiti određivanju potrebne snage termoelektrana u sustavu (i – uopće – zbroja snaga svih elektrana stalne moguće proizvodnje)? Načelno, trebali bismo poznavati moguće snage svih elektrana na nestalne prirodne izvore za svaki sat, svakog dana, svakoga mjeseca, barem desetak godina unazad. I to konkretnog sata za sve te elektrane, promatrane isto-

dobno – kako bi se *uhvatilo* što više prilika u kojima se te elektrane ali istodobno mogu naći: i sušne i vlažne prilike na pojedinim vodotocima i pojedinim slivovima do akumulacijskih hidroelektrana, i snažne vjetrove na jednom mjestu a potpuni smiraj na drugome mjestu i sve moguće kombinacije uzete zajedno sa svim mogućim kombinacijama hidroelektrana i na sve to dodati Sunčevo zračenje, koje izostaje noću ili koje je eventualno prigušeno naoblakom. Dakako za sve sadašnje elektrane. Za sve buduće takve elektrane nemamo podatke o proizvodnjama deset ili više godina unatrag, pa moramo pretpostaviti da su one bile izgrađene i bile pod utjecajem nestalnih prilika u kojima se našao njihov prirodni izvor (vodotoci, vjetar, osunčanost – prema statističkim podacima iz prošlosti) i računati njihove raspoložive proizvodnje kao da su i tih deset posljednjih godina bile izgrađene.

Može se stvar zamišljati jednostavnije, smanjenjem broja promatranih uzoraka; recimo na promatranje dnevnih ili tjednih ili čak samo mjesečnih mogućih proizvodnji i raspoloživih snaga, no tada se gubi na točnosti gledanja.

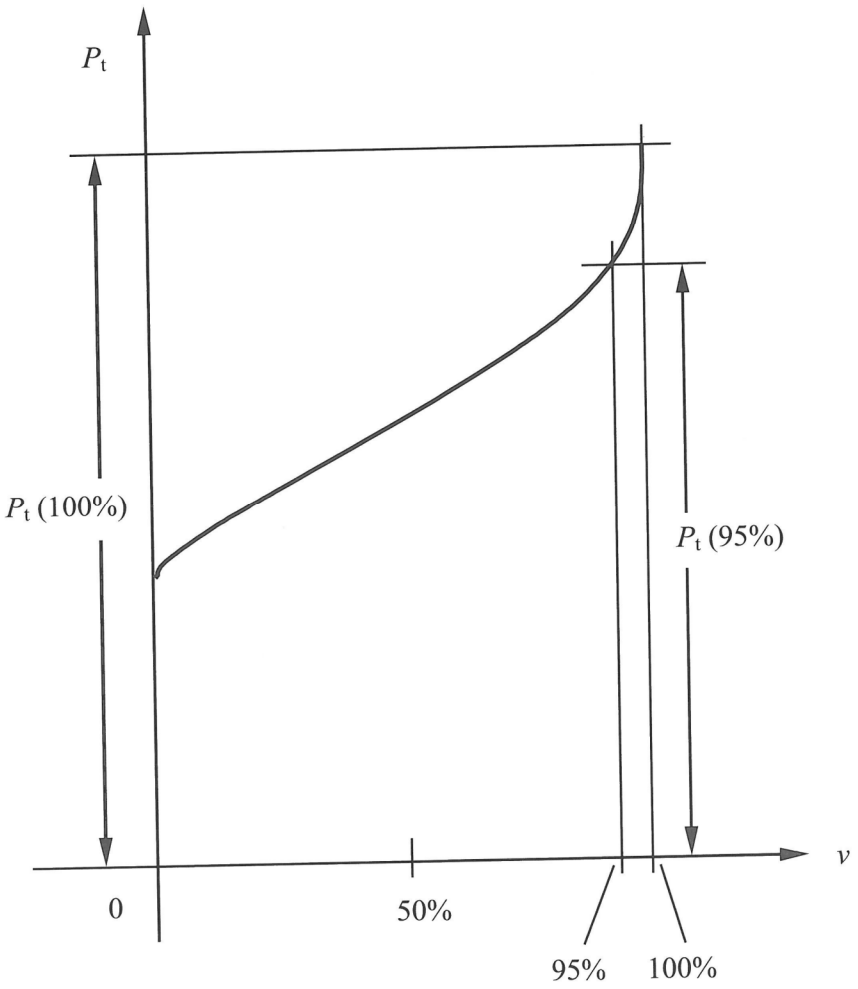
Uzmimo da smo promatrali satne prilike tijekom 10 godina, dobili bismo 87 600 satnih podataka o raspoloživim snagama pojedinih elektrana na nestalne izvore i njihove zbrojeve za svaki sat mogli bismo složiti u niz prema silaznim vrijednostima. Dobili bismo dijagram prikazan na slici 9.14. Što bismo mogli očitati iz tog dijagrama? Pa, vjerojatnost raspoložive




*Slika 9.14. Vjerojatnost pojave raspoložive snage elektrana na nestalne izvore energije u elektroenergetskom sustavu*

snage svih nestalnih izvora u našem sustavu za neki trenutak promatranja, današnji ili neki budući (za buduće morali bismo pribrajati snage i danas nepostojećih elektrana, kako je već istaknuto). Kolika je vjerojatnost da će te elektrane biti raspoložive onoliko koliko govori maksimalna vrijednost na tom dijagramu? Nula! A kolika je vjerojatnost da će te elektrane biti raspoložive barem onoliko, ili više od toga, koliko pokazuje minimalna vrijednost na tom dijagramu? Sto posto! Svakako, statistički je potpuno sigurno će ostvariti barem toliku raspoloživost. Koliku će raspoloživost ostvariti s 50-postotnom sigurnošću? Pa onu koja odgovara apscisi od 50 posto. I tako dalje. Dobili smo dijagram vjerojatnosti pojave raspoložive snage elektrana na nestalne izvore energije.

Ako istodobno tražimo s koliko je snage najviše trebalo angažirati stvarne ili zamišljene termoelektrane svakoga dana u tim prilikama tog sustava, dolazimo do pojma kritičnog razdoblja. To je kratko razdoblje u svakoj godini tijekom kojeg je bio potreban najveći angažman termoelektrana (i svih drugih elektrana na stalne izvore energije) – ili stoga što je u tom razdoblju bila najveća dnevna potražnja (s najvećim vršnim opterećenjem) ili stoga što je u tom razdoblju bila najmanja raspoloživa snaga elektrana na nestalne izvore ili iz oba ta razloga istodobno.




*Slika 9.15. Potrebna raspoloživa snaga termoelektrana u ovisnosti o sigurnosti opskrbe u elektroenergetskom sustavu s elektranama na nestalne izvore energije*

Te sve potrebne maksimalne dnevne snage termoelektrana poredamo u rastući niz potrebnih njihovih raspoloživih snaga. Dobivamo dijagram (slika 9.15) nad kojim se možemo pitati: s koliko snage u termoelektranama treba raspolagati naš sustav kako bi sigurnost opskrbe bila stopostotna? S onoliko koliko kazuje najveća od svih snaga u tom dijagramu. Na pitanje: s koliko snage u termoelektranama bi sigurno došlo do potrebe redukcije potražnje ili potrebe interventnog uvoza, odgovor je: s termoelektranama izgrađenim prema najmanjoj od tih snaga ili još manjom od te. Ako bismo se htjeli osigurati s 95-postotnom sigurnošću opskrbe, trebali bismo imati izgrađeno elektrana onoliko koliko odgovara apscisi 95 posto. A ako bismo htjeli vidjeti kolika je vjerojatnost potpune opskrbe za naše stvarno izgrađene termoelektrane, onda bismo zasjekli tu krivulju na mjestu njihove ukupne snage i očitali tu vjerojatnost.

Treba istaknuti da je ta krivulja vrlo strma na završetku; približavanjem 100-postotnoj vjerojatnosti – mnogo novih megavata treba izgraditi u termoelektrama za mala povećanja vjerojatnosti opskrbe. Još jedan razlog što je neracionalna 100-postotna sigurnost opskrbe.

Ekonomski gledano, optimalnu vjerojatnost opskrbe (ili njezin komplement: vjerojatnost djelomične redukcije) izabrat ćemo na osnovi razmatranja štete zbog neisporuke električne energije i troškova izgradnje nove termoelektrane kojom bi ta šteta izostala. Kada su te dvije vrijednosti izjednačene, dolazi do optimalne sigurnosti opskrbe.

Iz slike 3.13. vidljivo je kako je u godinama sa smanjenom domaćom proizvodnjom bio jače angažiran uvoz električne energije u Hrvatsku, a iz slike 6.20. vidljiv je inverzni angažman termoelektrana i hidroelektrana, kada je godina bila vlažnija – termoelektrane su proizvele manje energije i obrnuto.

Nijemci uzimaju da za 1 MW u vjetroelektranama treba imati rezervu od 0,85-0,95 MW u konvencionalnim termoelektranama. Hidroelektrane u Hrvatskoj ostvaruju godišnju proizvodnju između 3,5 i 7 TWh, treba dakle imati rezervu u konvencionalnim termoelektranama koje mogu proizvesti 3,5 TWh (7 – 3,5 = 3,5) u naglašeno sušnoj godini, a *stajati će*, u naglašeno vlažnoj godini. Uzmemo li godišnje trajanje instalirane snage termoelektrana od 5 000 h/god, izlazi da bi u Hrvatskoj trebala rezerva od oko 700 MW u konvencionalnim termoelektranama za naknadu izostale proizvodnje hidroelektrana u sušnoj godini. Nemamo li je, u sušnoj godini će ili doći do snažnog povećanja uvoza električne energije ili će doći do redukcije potražnje. Nema trećeg izlaza!

*Tablica 9.2. Omjer instalirane snage elektrana i vršnog opterećenja sustava, 2005*

| Zemlja | Snaga elektrana (MW) | Vršno opterećenje (MW) | Snaga elektrana/ Vršno opterećenje |
|---|---|---|---|
| Bosna i Hercegovina | 4021 | 1 891 | 2,13 |
| Austrija | 18 270 | 8 904 | 2,05 |
| Rumunjska | 15 647 | 7 974 | 1,96 |
| Slovačka | 8 038 | 4 323 | 1,86 |
| Luksemburg | 1 676 | 929 | 1,80 |
| Švicarska | 17 395 | 9 695 | 1,79 |
| Španjolska | 72 762 | 40 972 | 1,78 |
| Bugarska | 10 991 | 6 222 | 1,77 |
| Češka | 16 303 | 9 424 | 1,73 |
| Italija | 86 762 | 54 115 | 1,60 |
| Poljska | 32 077 | 21 578 | 1,49 |
| Njemačka | 119 300 | 80 879 | 1,48 |
| Portugal | 12 813 | 8 681 | 1,48 |
| Francuska | 115 543 | 82 319 | 1,40 |
| Srbija i CG | 9 897 | 7 126 | 1,39 |
| Slovenija | 2 804 | 2 075 | 1,35 |
| Hrvatska | 3 775 | 2 810 | 1,34 |
| Mađarska | 8 080 | 6 064 | 1,33 |
| Grčka | 11 304 | 8 596 | 1,32 |
| Nizozemska | 21 977 | 16 597 | 1,32 |
| Belgija | 16 068 | 13 059 | 1,23 |
| Makedonija | 1 527 | 1 450 | 1,05 |
| **UCTE** | **607 030** | **389 835** | **1,56** |

*Izvor: UCTE-Memo 2005*

U tablici 9.2. vidljive su rezerve što ih pojedini elektroenergetski sustavi imaju u elektranama. Primjerice, za interkonekciju UCTE u cjelini ta je rezerva 56 posto, dakle za 56 posto bila je veća ukupna instalacija elektrana od ukupnog vršnog opterećenja u 2005. godini. Međutim, tablica zahtijeva i mali komentar. Načelno, zemlje koje imaju veći udio hidroenergije (Austrija, Švicarska) trebale bi imati tu ukupnu rezervu veću od zemalja s malim udjelom hidroenergije (Mađarska, Belgija). No, i bogatstvo pojedine zemlje pruža mogućnost da se ukupni elektranski park u svojoj zemlji izgradi bogatije, s većom rezervom, u odnosu na siromašnije zemlje. Slučaj Bosne i Hercegovine znakovit je po tome što je zatečena snaga elektrana velika a – zbog

poraća i umrtvljenih gospodarskih aktivnosti – ostvaruje malo vršno opterećenje (i potrošnju električne energije). Vrijedi i za još neke bivše istočno-europske zemlje: izgrađenost elektrana veća je od njihova mogućeg korištenja, zbog urušavanja osobito bazične industrije u tim zemljama, početkom '90. godina prošlog stoljeća (Rumunjska, Slovačka).

Položaj Hrvatske u tom nizu zemalja nije osobito povoljan; s obzirom na veliki udio hidroenergije, trebali bismo imati veću rezervu u ukupnoj instaliranoj snazi (kao npr. Austrija ili Švicarska). No, doda li se tome i polovina NE Krško, koja je u našem vlasništvu, tada je ipak pokrivenost našeg vršnog opterećenja vlastitim elektranama oko 145 posto.

U čitavu poglavlju o snazi i energiji u elektroenergetskom sustavu govorili smo samo o potražnji i namirenju te potražnje najpovoljnijim angažmanom raspoloživih elektrana. Spominjali smo i uvoz električne energije, kada nema dovoljno raspoloživih elektrana u sustavu ili je to komercijalno prihvatljivije (jeftinija energija na europskoj elektroenergetskoj *tržnici* od proizvodnje u kojoj vlastitoj elektrani).

Istaknimo važnu ulogu prijenosne mreže u tome svemu: samo dobro dimenzionirana i oblikovana prijenosna mreža, raspoloživa u trenutku promatranja, omogućuje najpovoljniji angažman elektrana i najpovoljniji uvoz. Prethodno izlaganje izneseno je uz pretpostavku prijenosne mreže *raspoložive za bilo koje kombinacije elektrana* u sustavu (dakle, kao da prijenosna mreža ima neograničenu prijenosnu moć). Realno, to ponekad nije slučaj, pa onda ograničenja prijenosne mreže donekle sužuju mogućnosti angažmana elektrana. Primjerice, ako bi za elektranu A bilo najpovoljnije da radi punom snagom, a – zbog kvara na jednom vodu koji elektranu A povezuje s elektroenergetskim sustavom – preostane samo drugi vod, tada će elektrana moći raditi samo onom snagom koja je određena prijenosnom moći tog drugoga voda. Neka druga elektrana u sustavu morat će preuzeti preostatak snage, što će predstavljati prilike nepovoljnije od najpovoljnijeg načina namirenja potražnje.

# 10

# Gubici i vlastita potrošnja električne energije

Gubici pri opskrbi električnom energijom, u svim fazama te opskrbe: proizvodnji, prijenosu i distribuciji, svojstveni su i neizbježni, dakle, to je dio energije koji se objektivno nije mogao predati na korištenje kupcima-potrošačima.

Gubici (u elektroenergetskom sustavu), nes(p)retno imenovan pojam![121] Izabravši takav naziv tom pojmu, izložili smo ga krivom shvaćanju: nešto što je nepažnjom, nesmotrenošću, nemarom izgubljeno, a da je bilo pozornosti, nadzora, skrbi, mogao se taj gubitak izbjeći. Nešto što nam je bilo u džepu – a nehajno smo izgubili. U nas, najčešće korišten takav naziv u vezi je s poslovanjem („*ostvaren je gubitak u poslovanju od toliko-i-toliko milijuna kuna*") – tu je doista riječ o tome da se s više pozornosti, nadzora, skrbi, štednje, nerastrošnosti, izbjegavanja nepotrebnih troškova... mogao gubitak smanjiti, izbjeći, ili štoviše promijeniti u dobitak. Da li je tome tako u slučaju gubitaka u elektroenergetskom sustavu?

Krenimo od (fizikalnog) zakona o očuvanju energije, koji kaže da se energija ne može ni iz čega stvoriti, niti uništiti, već samo pretvoriti iz jednog oblika u drugi, ali uvijek tako da ukupna energija u tom procesu pretvorbe ostane sačuvana. Uložimo li u kakav proces 100 jedinica energije, iz tog procesa mora izaći ponovno 100 jedinica energije. Ako je proces svrhovit, smislen, tada je dio izlazne energije koristan – što je veći taj korisni dio, to je proces učinkovitiji. Međutim, prirodi svojstveno, nije moguće svu ulaznu energiju pretvoriti u korisnu energiju (*perpetuum mobile* druge vrste je nemoguć), već se manji ili veći dio ulazne energije pretvara u procesu pretvorbe u nekoristan oblik. Taj nekorisni dio nazivamo gubicima energije. (*Gubitke* bismo mogli dakle prikladnije zvati *nekorisna energija.*) Ovise o vrsti energetske pretvorbe, svojstvima uređaja u kojem se ta pretvorba zbiva, te energetskim parametrima koji se uspostavljaju u toj pretvorbi ali – u čitavu svemiru – nikako se ne mogu izbjeći.

Korisna energija je uložena energija umanjena za nekorisnu energiju ili umanjena za gubitke energije. Primjerice, ako električnu energiju pretvaramo u svjetlo žaruljom s užarenom niti, ostvarit ćemo tu pretvorbu tako da oko 95 posto električne energije pretvorimo u toplinu i zračenje nevidljivog spektra, a samo pet posto te energije u svjetlo. Te su gubici u tom primjeru čak enormnih 95 posto, jer žarulju nismo instalirali za grijanje nego za svijetljenje.

Gubici energije ne mogu se ikako izbjeći. Može se samo djelovati na njihovo ograničavanje, investiranjem u elektroenergetski sustav kako bi on sadržavao što više učinkovitijih jedinica i što povoljniju strukturu, te vođenjem pogona raspoloživog elektroenergetskog sustava uz nastojanje kako bi ti gubici bili što manji.

U gubitke pri ukupnoj opskrbi električnom energijom ne uračunavamo gubitke nastale prilikom pridobivanja, transporta i skladištenja prirodnih oblika energije, kao i gubitke pri pretvorbama tih oblika u oblike prikladne za korištenje u elektranama. Ukupne gubitke pri opskrbi električnom energijom računamo, dakle, kao razliku energetskog sadržaja svih oblika ulazne energije u elektrane i električne energije neposredno predane potrošačima-kupcima. Ti gubici sadrže:

- gubitke pretvorbe u električnu energiju,
- gubitke pri prijenosu električne energije,
- gubitke pri distribuciji električne energije.

[121] Ali i u drugim jezicima je jednako: *Verlust* u njemačkom, *loss* u engleskom, *perte* u francuskom su riječi koje se koriste za nazivanje tog pojma, a u prijevodu na hrvatski ne znače drugo nego *gubitak*.

Radi utvrđivanja električne energije, raspoložive za neposredno korištenje, tim se gubicima dodaje vlastita potrošnja električne energije u elektranama, u prijenosnoj i distribucijskoj mreži te u ostalom energetskom gospodarstvu (proizvodnji ugljena, nafte i plina, javnim toplanama, rafinerijama nafte i degazolinažama plina), jer se i ta električna energija, također, nije isporučila neenergetskim potrošačima-kupcima.

Razlikovati treba gubitke električne energije od vlastite potrošnje električne energije. Vlastita potrošnja ostvaruje se različitim elektromotornim pogonima (osobito u elektranama) te kao opća potrošnja (rasvjeta, grijanje, hlađenje, ventiliranje, klimatizacija, pogon radioničkih strojeva, uredska pomagala i sl.).

## Gubici pretvorba u električnu energiju

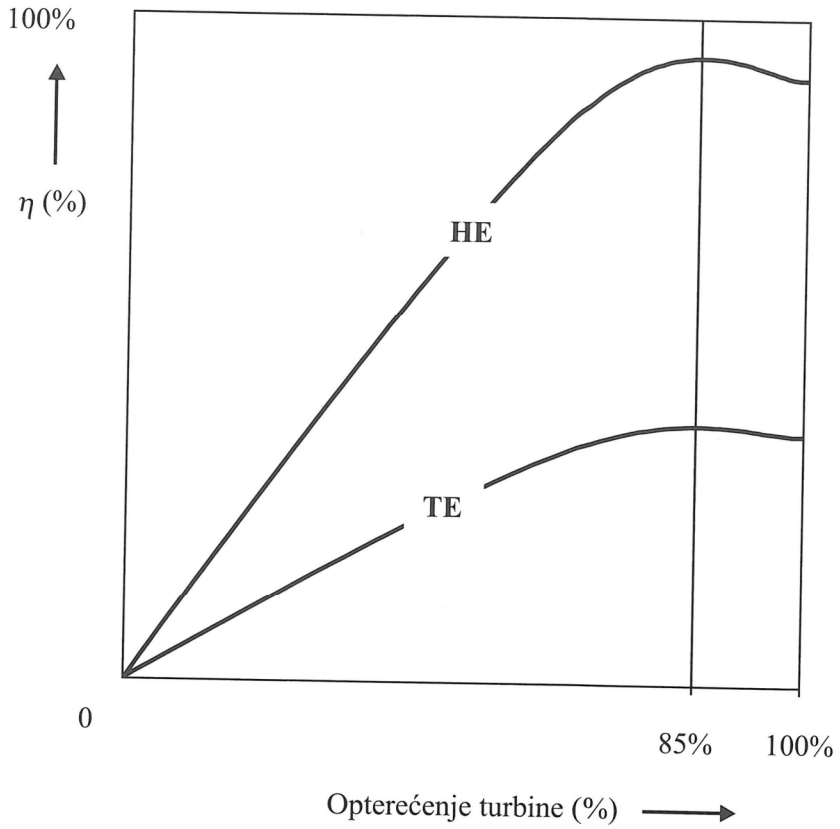
Najveći udio u gubicima imaju gubici pretvorbe nekog oblika energije u električni oblik energije. U starijim termoelektranama gubilo se 2/3 ulazne energije goriva pri toj pretvorbi, u najmodernijim parnim termoelektranama i plinsko-turbinskim termoelektranama i dalje se gubi oko 60 posto, u plinsko-parnim termoelektranama 40 posto, pri spojenom procesu proizvodnje električne i toplinske energije 15 posto ukupne energije goriva, jedino se u hidroelektranama pri najpovoljnijem korištenju gubi oko pet posto ulazne energije vode. Treba istaći da su ovdje spomenuti stupnjevi djelovanja izneseni za najpovoljnija opterećenja turbina, stupanj djelovanja *vrlo naglašeno* ovisi o stupnju opterećenja turbine, slika 10.1! Ako neka turbina u elektrani mora biti u pogonu pod stanovitim ali malim opterećenjem – gubici će biti vrlo visoki!

Ti su gubici pretvorba fizikalno uvjetovani, ne mogu se rapidno smanjivati, jedino upornim poboljšavanjem konstrukcija elektrana, radi povećanja njihove učinkovitosti. No, tu postoje fizikalna ograničenja. Ali, ide se na izgaranje ugljena u fluidiziranom sloju, gdje se čestice ugljena jačim upuhivanjem zraka uzdižu iznad ložišne rešetke; radi se na razvoju parne elektrane koja će raditi pri temperaturi pare od oko 700 °C, te na razvoju rasplinjavanja ugljena prije korištenja u plinskoj turbini... Najprivlačniji predmet istraživanja mogućnosti za povećanje stupnja djelovanja su elektrane ložene ugljenom, jer oko 40 posto svjetske proizvodnje električne energije potječe iz takvih elektrana. Dva se cilja postižu tim nastojanjima oko povećanja stupnja djelovanja: za istu proizvodnju električne energije potroši se manje ugljena i ostvari se manja emisija ugljikova dioksida.

Granična, maksimalno moguća vrijednost stupnja djelovanja toplinskog procesa (kakav se zbiva u svim termoelektranama i u toplinskom dijelu nuklearnih elektrana) koji se koristi za preobrazbu u mehanički rad, naziva se stupanj djelovanja Carnotova kružnog procesa. On iznosi

$$\eta_{\text{maks}} = 1 - T_2/T_1 \qquad (10.1)$$

gdje je $T_1$ apsolutna temperatura na ulazu u proces (dakle temperatura pare ili zapaljenog goriva), a $T_2$ apsolutna temperatura na izlazu iz procesa, dakle temperatura rashladnog sredstva (temperatura rijeke, jezera, mora, okolnog zraka). Temperatura na ulazu u proces ograničena je materijalom turbine ili toplinskog stroja, jer taj materijal mora podnijeti toliku temperaturu bez plastičnih deformacija i ubrzanog starenja, a temperatura okoline je zadana klimatskim okolnostima, i zapravo je u jednom ograničeno uskom području (između –25 °C i +40 °C, dakle između približno 250 i 310 K, u klimatskim prilikama kakve vladaju u nas).




*Slika 10.1. Stupanj djelovanja (η) termoelektrane i hidroelektrane u ovisnosti o opterećenju turbine*

Uzmemo li temperaturu ulazne pare u najmodernijoj parnoj elektrani od 580 °C (to je onda po prilici apsolutna temperatura 580 + 273[122] = 853 K) a temperaturu okoline elektrane od 20 °C (to je 20 + 273 = 293 K) izlazi da je maksimalni stupanj djelovanja toplinsko-mehaničke pretvorbe u toj elektrani 1 − 293/853 = 0,66 ili 66 posto.

Međutim, toliko visok stupanj djelovanja ostvario bi se u idealnom Carnotovu procesu koji realno nije ostvariv. U realnim procesima, maksimalno mogući stupanj djelovanja niži je od Carnotova, a još se i pogoršava gubicima topline zbog realno vodljive toplinske izolacije, trenja pri vrtnji stroja i ostalih nesavršenosti. To sve dovodi do toga da se u realnim turbinama ili toplinskim strojevima samo više (bolji, učinkovitiji, ali i skuplji stroj) ili manje (lošiji i jeftiniji stroj) približavamo tom idealnom stupnju djelovanja, ali ga ni na koji način ne možemo prijeći. Stupanj djelovanja termoelektrane u cjelini umanjen je još i zbog gubitaka u parnom kotlu ili komori izgaranja (ispred ulaza u toplinsko-mehanički dio procesa) i gubitaka u električnom generatoru (iza izlaza iz toplinsko-mehaničkog dijela procesa).

## Gubici pri prijenosu i distribuciji

Gubici pri prijenosu i distribuciji električne energije nastaju u vodovima i transformatorima prijenosne i distribucijske mreže. Ovise o kvadratu struje opterećenja i – uz zadano opterećenje snagom – manji su ako je napon prijenosa ili distribucije veći.

[122] Točno bi bilo dodavanje vrijednosti 273,15 K (kelvina) Celzijevim stupnjevima, vidjeti poglavlje 2.

Naime, uz zadanu snagu, struja je toliko puta manja koliko puta je napon veći. Primjerice, pri protoku snage od 1 000 kW uz napon 10 kV, struja na početku voda će biti 1 000/($\sqrt{3} \times 10$) = 57,8 A, a pri naponu 20 kV, struja će biti upola manja, dakle, 1 000/($\sqrt{3} \times 20$) = 28,9 A. To je ključni razlog posezanju za sve višim naponima u elektroenergetskim mrežama. Materijal za vodiče prijenosnih i distribucijskih vodova mogao bi se birati iz vrlo ograničenog spektra: bakar ili aluminij. Kako je bakar puno skuplji od aluminija, a Zemlja znatno siromašnija bakrom nego aluminijem[123], to je dopuštena jedino primjena aluminija odnosno alučeličnih vodiča (jezgra iz čeličnog užeta opletena opletom iz aluminijskih žica)[124]. Time se na smanjenje otpora vodiča može djelovati samo povećanjem njegova presjeka, ali ni to ne ide u nedogled.

Promjer vodiča od po prilici 3 cm gornja granica je povećanja, jer bi s debljim vodičima bilo naglašeno nespretno rukovati. Tom promjeru odgovara presjek od, otprilike, 1 000 mm$^2$. I to je najveći presjek koji se uobičajeno javlja za vodiče vodova prijenosnih mreža. U distribucijskim mrežama, uobičajeno, najveći primjenjivani presjek vodiča je desetak puta manji (na vodovima 35 kV: 120 mm$^2$, a na niskonaponskim vodovima 0,4 kV: 35 mm$^2$).

Ako je riječ o trofaznom vodu izgrađenom iz udvojenih alučeličnih vodiča presjeka 490/65 četvornih milimetara (presjek aluminijskog plašta/presjek čelične jezgre), jediničnog električnog otpora 0,06 Ω/km, duljine 200 kilometara (to je približno vod 400 kV Ernestinovo–Žerjavinec), tada je otpor jednog faznog vodiča polovina jednostrukog vodiča, dakle 1/2 × (200 × 0,06) = 6 oma. Prenosimo li tim vodom snagu od 500 MVA, to će struja koja teče vodičima biti 500/(1,73 × 400) = 0,7 kA ili 700 ampera[125]. Kvadriramo li tu struju i pomnožimo s otporom vodiča i sve još pomnožimo s tri, jer je iz tri takva vodiča izgrađen trofazni vod i svakim od tih vodiča teče tolika struja, izlazi da će neizbježni gubici u tom vodu biti oko 9 MW[126] ili 1,8 posto prenesene snage. Gubici pri dvostrukoj snazi bili bi četiri puta veći, dakle čak 36 MW. Za druge snage prijenosa, gubici bi bili prema tablici 10.1.

*Tablica 10.1. Gubici snage pri različitim opterećenjima voda* 400 kV, *duljine* 200 km

| Snaga (MVA) | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1 000 | 1 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Gubici (MW) | 0,4 | 1,4 | 3,2 | 5,8 | 9,0 | 13 | 18 | 23 | 29 | 36 | 44 |
| Gubici (%) | 0,4 | 0,7 | 1,1 | 1,5 | 1,8 | 2,2 | 2,6 | 2,9 | 3,2 | 3,6 | 4,0 |

Ako bismo – kako bi primjer bio što jednostavniji – umjesto stvarno promjenjivog opterećenja tog voda, uzeli da je opterećenje voda u svakoj četvrtini godine stalno i da iznosi

[123] Sastojci Zemljine kore, prema težinskim udjelima elemenata su: kisik (46,4%), silicij (28,2%), aluminij (8,2%), željezo (5,6%), kalcij (4,2%), magnezij (2,3%), kalij (2,1%), bakar (0,1%), cink i kositar (po 0,04%); aluminija je 80 puta više no bakra!

[124] Vrijedi za nadzemne vodove. Za vodiče u kabelima koristi se i bakar osim aluminija, jer mu je strujna opteretivost veća, a tanji kabel traži manje izolacije od debljega. U električnim instalacijama u zgradama preferira se naglašeno (i dopuštena je) primjena bakrenih vodiča radi njihove bitno veće neosjetljivosti prema mehaničkim oštećenjima, a kako se tu koriste tipično manji presjeci vodiča, oni su znatno izloženiji takvim oštećenjima. Također, aluminij je znatno više od bakra izložen elektrokoroziji, te je i to razlog zašto se za instalacijske vodiče primjenjuje bakar. Pažljivim mjerama, spojna se mjesta aluminijskih i bakrenih vodiča nadzemnih i kabelskih vodova štite od elektrokorozije.

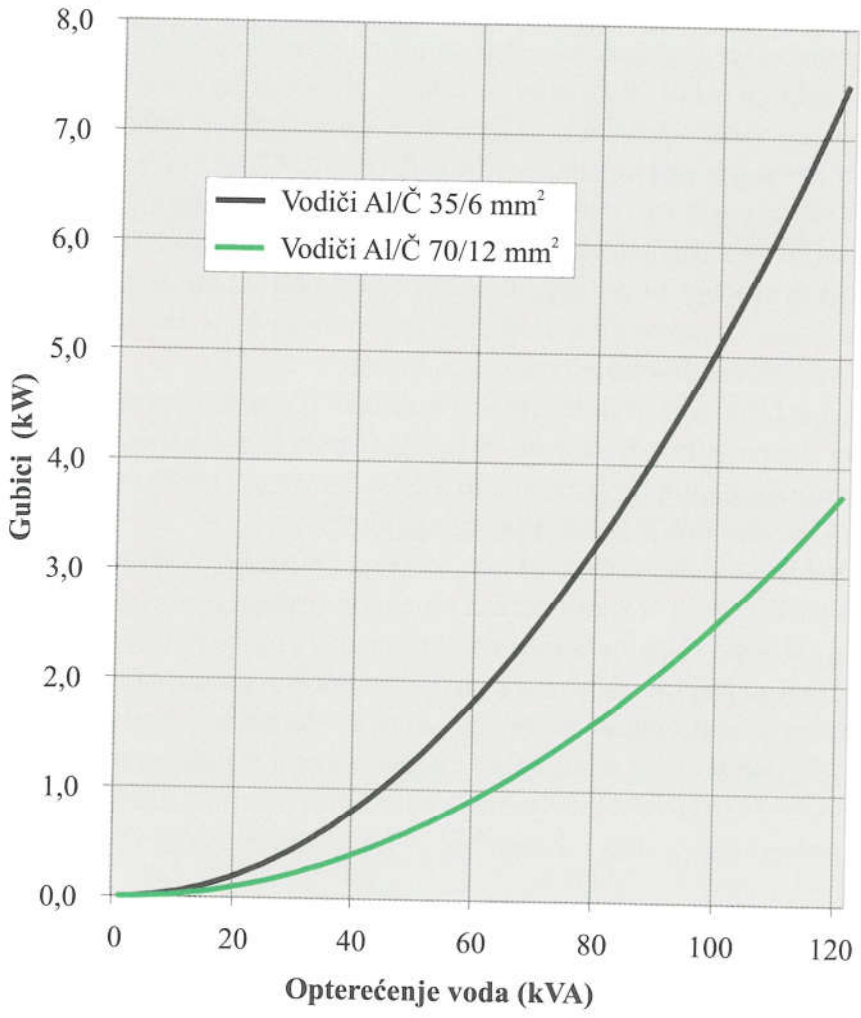
[125] Prema relaciji (2.30).

[126] Prema relaciji (2.14). To je jednako kao da na svakih 22 metra tog dalekovoda postoji jedna električna grijalica snage 1 kW, koja grije okolni zrak.

100 MVA u jednoj četvrtini, 200 u drugoj, 300 u trećoj i 400 MVA u četvrtoj četvrtini godine, tada bi tijekom cijele godine neizbježni gubici energije bili 23 652 MWh ili okruglo oko 24 milijuna kilovatsati. Što nije malo! I ne može se nikakvim mjerama izbjeći[127].

Na vodovima znatnije visokog napona (400 i 220 kV) javljaju se i gubici korone, koji ovise o naponu. Postoje trajno dok je vod pod naponom a naglo rastu s porastom vlage u zraku (snijeg, kiša, magla, mraz, led, inje). Prosječno godišnje, reda su veličine: oko 4 kW/km na vodu 400 kV s vodičima u dvostrukom snopu i oko 2 kW/km na vodu 220 kV s jednostrukim vodičima. Na vodu 400 kV dugom 200 km, ostvareni godišnji gubitak zbog korone je prosječno oko 7 000 MWh.

Promotrimo i postotne gubitke na jednom uobičajenom niskonaponskom vodu (nazivni napon 0,4 kV) izvedenom vodičima iz alučelika presjeka 35/6 mm$^2$, duljine 100 metara, kojem je na kraju priključeno trofazno opterećenje od 100 kVA (ili 95 kW, uz faktor djelatne snage 0,95;




*Slika 10.2. Gubici djelatne snage na trofaznom vodu* 0,4 kV *duljine* 100 m *opterećenom na kraju*

[127] Kako protumačiti smisao tih gubitaka? Ulagali smo energiju na jednom mjestu i prenosili tu energiju radi korištenja na 200 kilometara udaljenom drugom mjestu i to je *koštalo* – taj energetski proces ne može se odvijati bez gubitaka! Jednostavnije: da smo vodu utiskivali crpkom, kakvim cjevovodom na neku udaljenost, također bismo morali uložiti energiju da svladamo trenje, utrošivši tu energiju za strujanje vode kroz cjevovod.

tada je 95 kW/0,95 = 100 kVA). Otpor vodiča[128] je 100/(34,5 × 35) = 0,083 Ω. Struja koja teče tim vodom je 100/(√3 × 0,4) = 144,5 A. Tolika struja teče svakim od tri fazna vodiča te su gubici 3 × 144,5² × 0,083 = 5 200 W ili 5,2 kW. Dakle, gubici su 5,2 posto snage koja se na kraju voda predaje trošilima, za toliko je veća snaga na početku voda! Za druga opterećenja na kraju voda, gubici bi se mijenjali razmjerno kvadratu omjera tog opterećenja i opterećenja 100 kVA; prikazani su tablicom 10.2. i slikom 10.2. Na toj slici prikazano je i prepolovljenje gubitaka do kojega bi došlo – ako se taj vod izvede vodičima dvostrukoga presjeka, dakle Al/Č 70/12 mm².

*Tablica 10.2. Gubici pri različitim opterećenjima voda 0,4 kV, duljine 100 m*

| Snaga (kVA) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Gubici (kW) | 0,05 | 0,21 | 0,47 | 0,83 | 1,30 | 1,87 | 2,55 | 3,33 | 4,21 | 5,20 | 6,29 |
| Gubici (%) | 0,52 | 1,04 | 1,55 | 2,08 | 2,60 | 3,12 | 3,64 | 4,16 | 4,68 | 5,20 | 5,72 |

Za smanjenje gubitaka u mreži nema drugog načina osim udvostručavanja najopterećenijih vodova ili udvostručenju presjeka vodiča tih vodova. To vodi smanjenju otpora takvog udvostručenog voda na polovinu u odnosu prema otporu jednostrukog voda. Ako bi opterećenje u oba slučaja ostalo jednako, to bi dovelo do smanjenja gubitaka na polovinu. Ima li se na umu da hrvatska prijenosna mreža sadrži oko 7 250 km vodova, a distribucijska mreža oko 130 000 km vodova, znači da bi za smanjenje ukupnih gubitaka u tim vodovima na polovinu trebalo izgraditi još jednu paralelno priključenu mrežu od preko 137 000 km. Naglasimo: i u tom slučaju bi neizbježni gubici postojali, samo bi postali upola manji uz nezamisliva i praktički neprovediva ulaganja (prijenosna i distribucijska mreža u Hrvatskoj imaju nabavnu vrijednost od oko 30 milijarda kuna!).

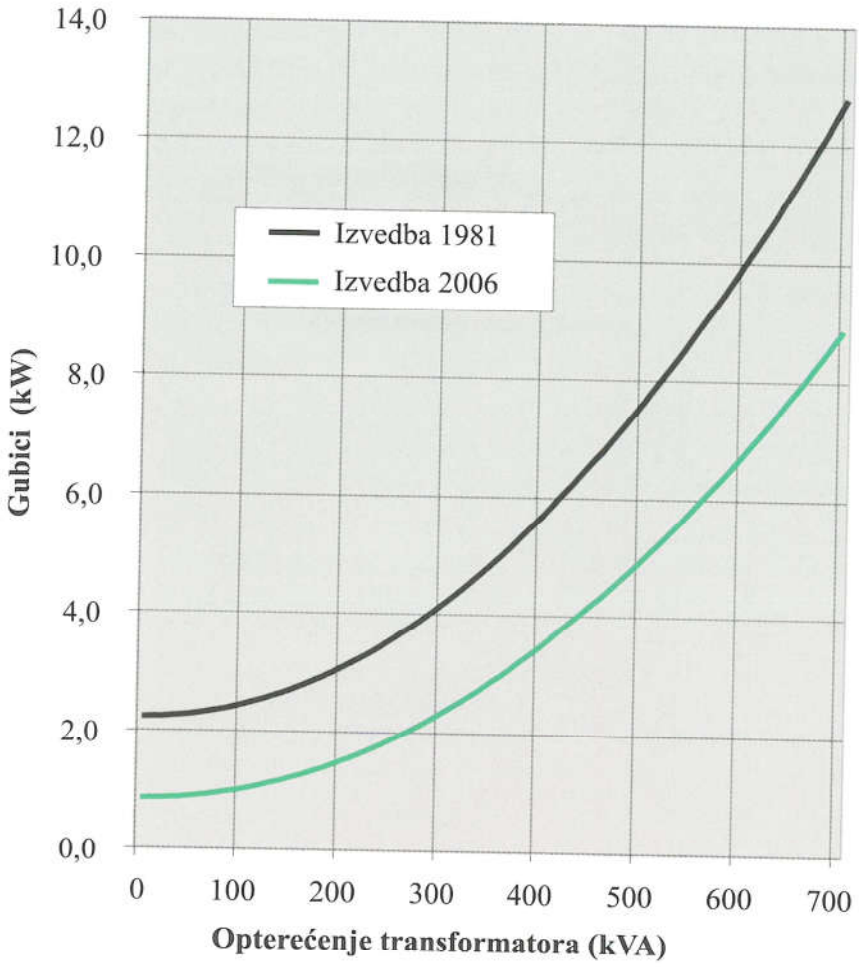
Ostaje još jedna bitna mjera za smanjenje gubitaka u mreži: posvemašnje uvođenje kompenzacije jalove snage u mreži, što bliže mjestu njezine potražnje. Smanjuje se struja u mreži i time snižavaju gubici djelatne snage u čitavoj mreži. Dobitak nije spektakularan, on je elementaran. Doduše, i to je povezano s ulaganjima.

Gubici u transformatorima sastoje se od gubitaka u praznom hodu transformatora, koji postoje odmah pri priključenju transformatora na napon (gubici praznog hoda, gubici u željezu transformatora) i gubitaka zbog opterećenja transformatora (gubici kratkog spoja, gubici u bakru transformatora), koji nastaju u vodičima transformatora i ovise o kvadratu struje opterećenja. Slika 10.3. Transformatorski gubici snižavaju se sve modernijim konstrukcijama transformatora, uz primjenu sve kvalitetnijeg materijala za njihove jezgre i smanjenje njihovih geometrijskih dimenzija, tablica 10.3. Tu su iskazani gubici u bakru pri nazivnom opterećenju transformatora; pri polovičnom opterećenju gubici u bakru bili bi 1/4 iskazanih, odnosno (1/2)².

*Tablica 10.3. Gubici u transformatoru 10/0,4 kV, 630 kVA*

| Godina proizvodnje | Gubici u željezu, gubici praznog hoda (kW) | Gubici u bakru, gubici zbog opterećenja (kW) | Ukupni gubici uz nazivno opterećenje (%) |
|---|---|---|---|
| 1961. | 2,23 | 8,55 | 1,71 |
| 1981. | 1,30 | 6,50 | 1,23 |
| 2006. | 0,86 | 6,50 | 1,17 |

[128] Prema relaciji (2.9); uzima se da struja teče samo aluminijskim plaštem vodiča iz alučelika.




*Slika 10.3. Gubici djelatne snage u transformatoru* 10/0,4 kV, 630 kVA

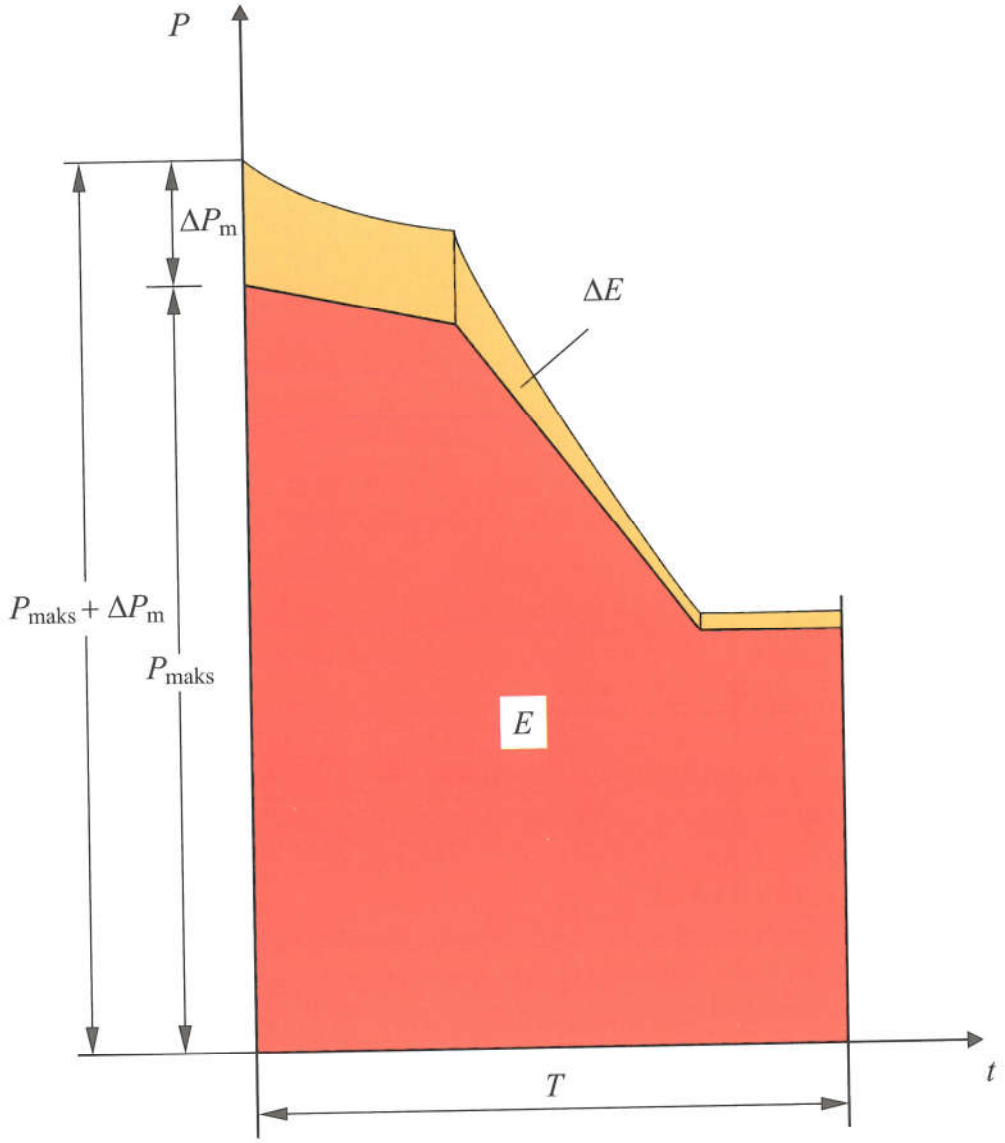
Djelovanje na smanjenje gubitaka u transformatorima, svodi se, dakle, na prijevremenu zamjenu starijih transformatora u mreži novim transformatorima, koji imaju snižene gubitke. Opet, uz ograničene mogućnosti za to (i najmoderniji transformatori također imaju neizbježne gubitke), a uz velika ulaganja.

Druga je mogućnost za sniženje gubitaka transformatora, ako ih je više u paralelnom radu, prilagodba broja paralelno uključenih transformatora ukupnom opterećenju. Primjerice, kod malog ukupnog opterećenja dva paralelno spojena transformatora, sa stajališta ukupnih gubitaka nije pogodno da su oba transformatora u pogonu, jer je snaga jednoga dovoljna za pokriće ukupnoga opterećenja, a gubici praznog hoda postoje u punom iznosu oba transformatora. Međutim, tu valja biti oprezan: pouzdanost jednog transformatora manja je od pouzdanosti dva transformatora u paralelnom radu – te treba odlučiti da je li nam važnija veća pouzdanost ili smanjenje gubitaka[129].

Pojava gubitaka na vodovima i u transformatorima čini analizu prilika u elektroenergetskom sustavu složenijom! Naime, gubici su kvadratno ovisni o opterećenju svake

[129] Ako bi pouzdanost svakoga od dva paralelno priključena transformatora bila po 0,98 (nepouzdanost, dakle, 0,02), tada bi ukupna pozdanost takva paralelna spoja bila $1 - 0{,}02 \cdot 0{,}02 = 1 - 0{,}0004$, dakle 0,9996! Dakako, u slučaju da je ukupno opterećenje takvo da ga može podnijeti jedan transformator. Takvom povećanju pouzdanosti paralelnim spajanjem jedinica sustava vrlo često pribjegavamo: paralelnim transformatorima i paralelnim vodovima.

jedinice mreže (slika 10.4) pa se ne mogu dodavati netopotražnji cijelog elektroenergetskog sustava jednostavnim postotnim uračunavanjem uz tu potražnju, kako bi se dobila brutopotražnja na razini sustava. Dakako, tu brutopotražnju trebaju namiriti elektrane angažirane u elektroenergetskom sustavu! Sve dijagrame trajanja opterećenja u prethodnom poglavlju treba razumijevati na način da su u njima prikazane brutopotražnje električne energije, dakle netopotražnja uvećana za gubitke u mrežama.




*Slika 10.4. Gubici snage i energije na vodu ili transformatoru i dijagram trajanja netopotražnje električne energije*

# Gubici u prijenosnoj i distribucijskoj mreži Hrvatske

Najčešće se gubici iskazuju postocima, stoga je nužan prethodni dogovor o tome što ćemo uzeti kao 100 posto. Odlučimo se na najegzaktniji pristup. Ako je ulazna energija u neki proces $E_1$ a izlazna energija iz tog procesa $E_2$, tada su gubici energije

$$\Delta E = E_1 - E_2 \qquad (10.2)$$

odnosno, ulazna energija je

$$E_1 = E_2 + \Delta E. \qquad (10.3)$$

Ulaznu energiju moramo uzeti kao 100 posto i onda je raspodijeliti na izlaznu energiju, recimo 95 posto, i gubitke, u tom primjeru pet posto.

Stoga su postotno iskazani gubici energije

$$\Delta E\% = 100 \cdot \Delta E / E_1 \qquad (10.4)$$

ili, jer češće poznajemo izlaznu energiju

$$\Delta E\% = 100 \cdot \Delta E / (E_2 + \Delta E) \qquad (10.5)$$

Računajući prema (10.5) i uzevši u obzir da je izlazna energija iz prijenosne mreže ona što je predana priključenoj distribucijskoj mreži, izravnim kupcima, energija za crpljenje u CAHE i ostaloj potrošnji na prijenosnoj mreži, u tablici 10.4. prikazani su godišnji postotni gubici u prijenosnoj mreži Hrvatske.

*Tablica 10.4. Gubici u prijenosnoj mreži Hrvatske*

| Godina | 1998. | 1999. | 2000. | 2001. | 2002. | 2003. | 2004. | 2005. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Gubici (%) | 3,2 | 3,7 | 4,4 | 4,5 | 4,6 | 4,3 | 3,7 | 3,4 |

*Izvor: Izvještaj o poslovanju HEP-OPS 2005*

Godišnji postotni gubici u distribucijskoj mreži Hrvatske prikazani su tablicom 10.5. Izlazna energija je ovdje, dakako, energija predana na korištenje kupcima-potrošačima priključenim na distribucijsku mrežu.

*Tablica 10.5. Gubici u distrubucijskoj mreži Hrvatske*

| Godina | 1998. | 1999. | 2000. | 2001. | 2002. | 2003. | 2004. | 2005. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Gubici (%) | 14,7 | 11,8 | 10,8 | 13,3 | 10,0 | 12,8 | 10,7 | 9,9 |

*Izvor: Godišnje izvješće HEP-ODS 2005*

Upozorimo na olaku primjenu relacije (10.4) pri računanju postotnih gubitaka – olakim povećanjem nazivnika ($E_1$) činimo povoljnije postotne gubitke, računski ih prividno snižavamo. Kod međunarodnih usporedbi valja stoga biti oprezan – treba točno znati što se uračunalo u nazivnik kod postotnog iskaza gubitaka.

Također, upozorimo i na nepromišljeno poistovjećivanje gubitaka energije i gubitaka snage; ako je gubitak snage u nekom trenutku pet posto – nikako ne znači da je i gubitak energije u određenom razdoblju tolik. Mijenja li se opterećenje tijekom vremena, svakoj snazi odgovarat će određen gubitak snage, uglavnom kvadratno ovisan o tom opterećenju. Poveća li se opterećenje dvaput, gubici će se povećati četiri puta. To vodi tome da gubitak energije možemo računski utvrditi, samo poznavanjem dijagrama trajanja opterećenja u razdoblju za koje želimo utvrditi gubitak energije.

Inače, za mjerenje gubitaka energije u mreži služimo se brojilima električne energije ugrađenim na mjestu preuzimanja energije u mrežu i na mjestu predaje energije iz mreže i prema relaciji (10.2) utvrđujemo gubitke. Pri tome je naglašena potreba visoke točnosti takva mjerenja, jer gubici imaju sličan red veličine kao i granice točnosti mjerenja (neka brojilo na ulazu u mrežu griješi za −0,5 posto, izlazno brojilo za +0,5 posto, izmjereni će gubici biti za jedan posto manji od stvarnih; ako bi stvarni gubici bili tri posto, izmjereni gubici će u tom slučaju biti dva posto, dakle 2/3 istinitih!).

Dodajmo i to da se uz gubitke, naglašeno u gubitke u distribucijskoj mreži, *uvlače* i razni drugi razlozi, osim tehničkih. Neovlašteno korištenje električnom energijom i krađu u konačnici također ubrajamo u gubitke (te sveukupne gubitke nazivamo komercijalnim gubicima), a netehničke gubitke nastojimo organizacijskim mjerama svesti na najmanju moguću mjeru.

## Gubici jalove snage

Premda jalova snaga i energija ne traže za svoje pokrivanje dopunsku snagu i energiju koju bi trebalo ulagati u elektroenergetski sustav (to traži samo pokrivanje potražnje djelatne snage i energije), ipak protok jalove snage izaziva povećanje struje između mjesta njezine potrošnje i mjesta proizvodnje pa time: (a) smanjuje moguće opterećenje djelatnom snagom svih jedinica sustava i (b) povećava gubitke djelatne snage u tim jedinicama. Stoga neprekidno naglašavamo potrebu kompenzacije jalove snage.

Međutim, na vodovima i transformatorima nastaju, pored gubitaka djelatne snage, i gubici jalove snage koji se kombiniraju s jalovim opterećenjima trošila. Gubici jalove snage u transformatorima ovise o naponu na koji je priključen transformator (veličina te komponente jalovih gubitaka je približno jedan posto nazivne snage transformatora, dakle za transformator snage 100 MVA, ti gubici su oko 1 Mvar). Dalji gubici jalove snage nastaju opterećivanjem transformatora, ovise o kvadratu struje opterećenja i oni su – pri nazivnom opterećenju transformatora – oko četiri do 12 posto (za manje transformatore niži postotak, a za velike transformatore viši). Transformator snage 100 MVA imao bi te gubitke oko 10 Mvar, no to ovisi o konstrukciji transformatora. Ti se gubici na ulaznoj strani transformatora pribrajaju jalovom opterećenju transformatora i tvore ukupno jalovo opterećenje mreže na ulazu transformatora.

Gubici jalove snage na visokonaponskom vodu mogu biti pozitivni (dakle takvi da predstavljaju dopunsko jalovo opterećenje u čvorištu na koje je vod priključen, vod je dodatni induktivni potrošač) ali i negativni (dakle takvi da umanjuju jalovo opterećenje u čvorištu na koje je vod priključen, tada se vod ponaša poput kondenzatora). Ta, *kondenzatorska* proizvodnja voda ovisna je o naponu i stalna je ako je napon stalan, a induktivna potrošnja povećava se s kvadratom struje opterećenja. Postoji jedno opterećenje, zove se *prirodna snaga*

voda, pri kojem je kondenzatorska proizvodnja jednaka induktivnoj potrošnji voda i dalje povećanje opterećenja voda vodi povećanju induktivne potrošnje. Kao primjer, iznesimo to da svakih 100 kilometara voda 400 kV proizvodi kapacitivnu jalovu snagu od oko 50 Mvar te da je prirodna snaga tog voda oko 530 MW. Dakle, neopterećen vod te duljine priključen na napon ponašao bi se kao kondenzator uz proizvodnju jalove snage od 50 Mvar. Rastom opterećenja voda, smanjivala bi se ta kapacitivna potrošnja (jer bi rasla induktivna potrošnja) a – pri opterećenju tog voda s 530 MW – ne bi bilo uopće jalovog opterećenja zbog tog voda i pri opterećenjima većim od 530 MW, induktivno jalovo opterećenje zbog tog voda raslo bi razmjerno kvadratu opterećenja.

Takva situacija s gubicima jalove snage na prijenosnim vodovima znatno usložnjava vođenje pogona prijenosne mreže; ispad jednog voda iz pogona može drastično promijeniti sve tokove jalove snage u mreži i dovesti do nesavladiva debalansa namirenja potražnje jalove snage ili barem do bitne promjene napona u pojedinim čvorištima mreže. Jer je naponsko stanje nekog čvorišta u mreži uvjetovano saldom jalove snage u tom čvoru i idealno bi bilo da je taj saldo jednak nuli (koliko se potražuje u pojedinom čvorištu da se toliko i proizvodi u tom čvorištu).

Na niskonaponskim i srednjonaponskim vodovima ta pojava nije naglašena, stoga što je kapacitivna komponenta ovisna o kvadratu napona i duljini voda. Kako je i jedno i drugo mnogostruko manje kod distribucijskih vodova, neznatna je njihova proizvodnja jalove snage, pa izlazi da oni sudjeluju u gubicima jalove snage samo induktivnom komponentom, razmjernom kvadratu njihova opterećenja i duljini voda.