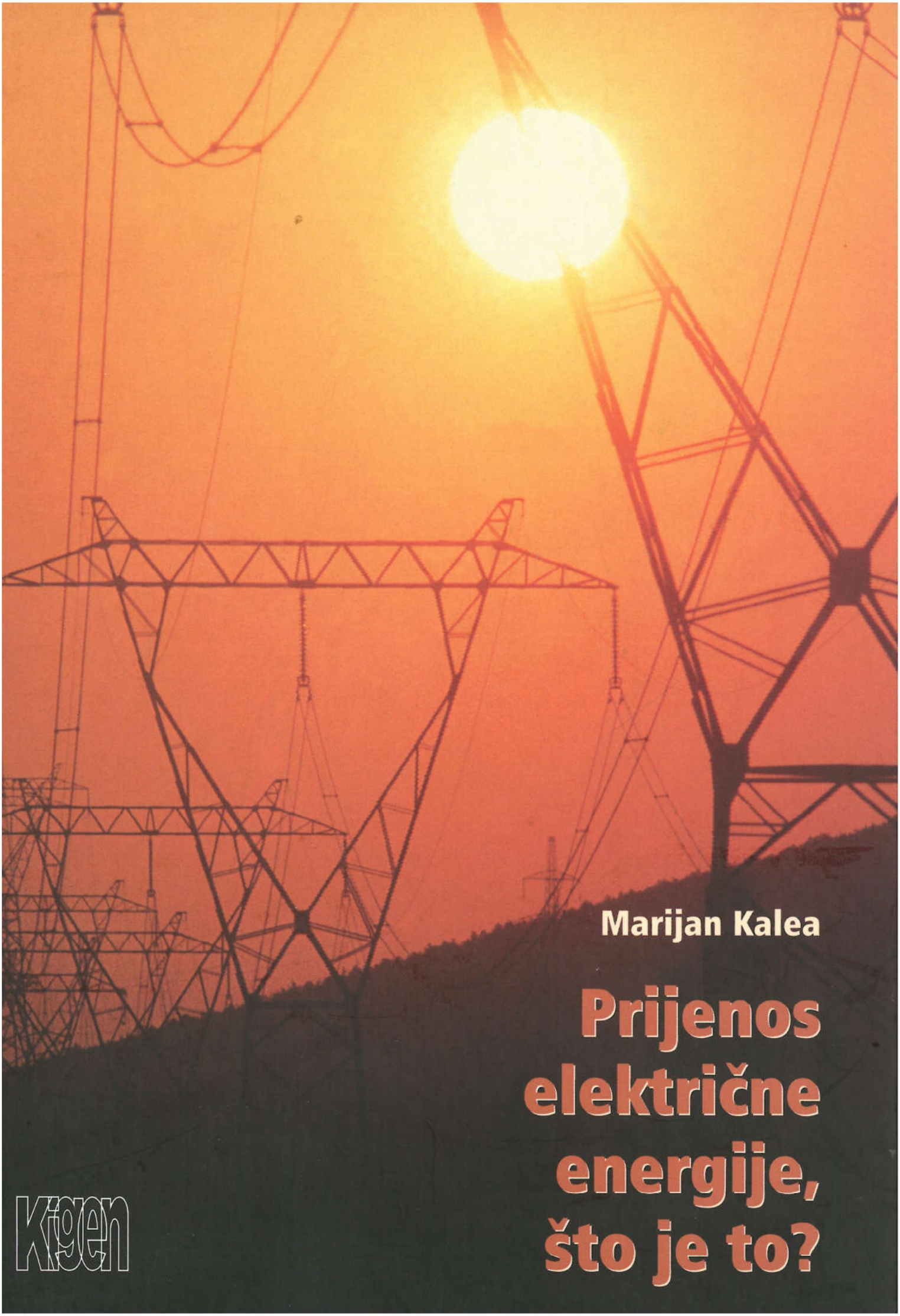


Marijan Kalea

Prijenos električne energije, što je to?

Kigen

Marijan Kalea

PRIJENOS ELEKTRIČNE ENERGIJE, ŠTO JE TO?

Izdavač
Kigen d.o.o. Zagreb

Za izdavača
Nenad Lihtar

Urednik
Vera Vujović

Recenzenti
Prof. dr. sc. Zdravko Hebel
Mr. sc. Zdenko Tonković
Božidar Radmilović, dipl. ing.
Josip Moser, dipl. ing.

Lektorica
Vera Vujović

Grafički urednik
Igor Gorkič

Tisak
Tiskara Zelina d.d.

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

CIP - Katalogizacija u publikaciji
Nacionalna i sveučilišna knjižnica - Zagreb

UDK 621.31

KALEA, Marijan
Prijenos električne energije, što je
to? / Marijan Kalea. - Zagreb : Kigen,
2006

ISBN 953-6970-23-6

I. Elektroenergetika -- Osnovni pojmovi

301018131

ISBN 953-6970-23-6

Marijan Kalea

PRIJENOS ELEKTRIČNE ENERGIJE, ŠTO JE TO?

Kigen
Zagreb, 2006

U pripremanju ove knjige prigodom 50 godina organiziranog prijenosa električne energije u Hrvatskoj, nameće mi se misao našeg učitelja, profesora i akademika Hrvoja Požara (1916–1991): vrijednost svake jedinice (energetskog, elektroenergetskog) sustava ovisna je, kako o značajkama te jedinice – tako i o značajkama sustava, te nije stalna nego se s vremenom mijenja. Uspomeni na Profesora, ovo pisanje posvećujem.

1

Predgovor

Knjiga je rasla na rubu mog stola u uredu i u brojna duga povečerja kod kuće, tijekom gotovo polovine mog radnog vijeka. Objavljena je djelomice u desetak članaka u Vjesniku Hrvatske elektroprivrede u raznim navratima počevši od 1991. godine, godine koja je bila obilježena kao svjetska stogodišnjica trofaznog prijenosa električne energije. Za ovu prigodu, dakako, ti su izvorni članci preuređeni, homogenizirani i aktualizirani te dopunjeni brojnim novima.

Knjiga je namijenjena ponajprije najširem krugu čitatelja zainteresiranih za područje prijenosa električne energije, nikako nije udžbenik nego zapravo skup eseja kojima se nastoji uputiti u to područje u najšire mogućem kontekstu. Od širokog prostornog zahvata (načelno, to je svijet), preko vremenskog zahvata (to je posljednjih stotinjak godina), do smještaja prijenosa električne energije u elektroenergetski sustav, u elektroprivredu i u energetiku općenito. Svaku užu struku, pa tako i prijenos električne energije, dobro je sagledavati u najširem mogućem kontekstu kako bi se istaknule brojne i isprepletene međuovisnosti a – opet – i specifičnosti i obilježja baš te uže struke. Stoga knjiga može poslužiti i studentima elektrotehnike kao šira dopuna udžbeniku, novinarima, političarima i – u krajnjoj liniji – svim energetičarima kojima prijenos električne energije nije uža specijalnost, ali bi htjeli biti načelno informirani i o prijenosu. Konačno, mogu je koristiti i prijenosaši, kojima bavljenje užom specijalnošću nije dalo vremena za općenitija sagledavanja.

Bio sam nakanio objaviti ovu knjigu prije desetak godina, pa je rukopis bio upućen na recenziju dvoma cijenjenim našim stručnjacima za područje prijenosa električne energije, Borisu Markovčiću, diplomiranom inženjeru elektrotehnike i doktoru Zorku Cvetkoviću. Oni su mi tada iznijeli svoje sugestije, koje sam ja tek sada prihvatio onako kako sam umio i znao, pa im se najtoplije zahvaljujem.

Zahvaljujem se i recenzentima ove konačne verzije knjige, koji su svaki sa svoje strane dali niz korisnih savjeta i sugestija: doktoru Zdravku Hebelu, profesoru na Fakultetetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu, magistru Zdenku Tonkoviću, te diplomiranim inženjerima elektrotehnike Božidaru Radmiloviću i Josipu Moseru. Nastojao sam uzeti u obzir i njihove savjete, opet onako kako sam znao i umio. Josipu Moseru hvala i za neprestano poticanje da knjigu dovršim. Akademiku Boži Udovičiću hvala za uređenje koncepcije knjige.

Zahvaljujem i Kigenu, osobito njegovu direktoru Nenadu Lihtaru, koji se pobrinuo da knjiga izađe dolično opremljena.

U Osijeku, veljače 2006. godine

M. Kalea

1

Sadržaj

1. Svijet energije 11
2. Svjetska energetika na prijelazu tisućljeća 15
3. Povijesni put svjetske javne elektrifikacije 25
4. Svojstva električne energije 39
5. Prijenos električne energije 45
6. Prijenosna mreža i okolina 51
7. Prije sto petnaest godina 61
8. Plodonosna eksplozija otkrića 67
9. Skladnom dopunom do elektroenergetskog sustava 73
10. Povezivanje elektroenergetskih sustava 79
11. Tržišna elektroprivreda 91
12. Suvremeni pogled na prijenos električne energije 95
13. Gubici u mreži 103
14. Razvoj prijenosnog napona 107
15. Prijenosni dalekovodi 115
16. Transformatori 129
17. Visokonaponski prekidači 135
18. Visokonaponska rasklopna postrojenja 141
19. Tendencije u sekundarnom postrojenju 153
20. Razvoj i izgradnja prijenosne mreže 163
21. Pogon i održavanje prijenosne mreže 167
22. Raspoloživost jedinica prijenosne mreže 177
23. Prijenos istosmjernom strujom visokog napona 187
24. Dalekovod ili cjevovod? 195
25. Nekonvencionalni izvori energije i prijenos električne energije 199
26. Povijest prijenosa električne energije u Hrvatskoj 207
27. Budućnost prijenosa električne energije 219

Literatura 227

1

Svijet energije

Energija je presudni čimbenik opstanka ljudske vrste, poput zraka, hrane i vode. Razvojne stepenice čovjekova puta na Zemlji mogu se uočiti praćenjem energetske povijesti. Najprije se, dakako, čovjek služio snagom svojih mišića. Iz pretpovijesti dolazi korištenje snagom ljudskih mišića za obavljanje rada uz pomoć poluge i klina. Iz tog je doba i korištenje vatrom, za zagrijavanje čovjekova životnog prostora, za rasvjetu, pripremu jela i najraniju proizvodnju (lončarstvo). Iz antike potječe korištenje koloturom. U ranim razdobljima poznate povijesti, robovlasnička kasta razvija sustav umnažanja snage ljudskih mišića kojom se koristi. Daljnje pojačavanje snage dolazi korištenjem životinjskim mišićima (konja, volova, ...), koje u našim krajevima traje sve do druge polovine prošlog stoljeća, a negdje u svijetu nije nestalo ni danas.

Važno za ljudski rod bilo je posezanje za vodotokom kao pokretačkom snagom u mlinovima za mljevenje žita, poznato iz rimskog doba. Također, za vjetrom koji pokreće jedrenjake ili se iskorištava za pogon u mlinovima, što se osobito razvija u srednjem vijeku. Snaga vode ili snaga vjetra bila je daleko učinkovitija od snage ljudskih ili životinjskih mišića.

S početka naše ere u Kini započinje korištenje ugljenom kao gorivom. Međutim, glavnina potreba za grijanjem tijekom čitava srednjeg vijeka namiruje se drvetom te biljnim i životinjskim otpacima. Dolazi do znatnog iscrpljivanja šuma, pa se ugljen postupno sve više iskorištava, kako za zagrijavanje – tako i za proizvodnju opeke, stakla i željeza. No i u najnovije doba, u Zemljinim prostranstvima koja civilizacija još nije bitno izmijenila, drvo te biljni i životinjski otpaci jedini su izvor energije.

Znatan pomak nastupa na prijelazu 18. u 19. stoljeće, kada izumom parnih strojeva dolazi do korištenja vodenom parom proizvedenenom u kotlovima loženim ugljenom. Počinje industrijski način proizvodnje, otpočinje industrijska revolucija. Ubrzo, parni se stroj koristi i za pogon željeznice i parobrodova. Kemijska energija sadržana u nafti koristi se potkraj 19. stoljeća za rasvjetu i grijanje, a od početka 20. stoljeća – izumom motora s unutrašnjim sagorijevanjem – i za pogon prometnih sredstava, na kopnu, vodi i u zraku. Po prilici, pola stoljeća nakon nafte koristi se i prirodni plin koji se pridobiva uz nalazišta nafte ali i na samostojećim nalazištima.

Napokon, sredinom prošlog stoljeća na svjetsku energetsku pozornicu dolazi nuklearna fisijska energija, a pred nama je tek iskorištavanje fuzijske nuklearne energije. 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.

Karakteristično je da se do pred kraj 19. stoljeća energija tada raspoloživih prirodnih izvora energije morala dopremati na mjesto korištenja (ugljen, nafta) ili se mjesto njihova pridobivanja moralo slagati s mjestom njihova korištenja (vodne snage, vjetar). Tek krajem 19. stoljeća dolazi do primjene električnog prijenosa energije na daljinu. To je omogućilo iskorištavanje prirodnih oblika 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, na mjestu toga korištenja ona se mora preoblikovati u koristan oblik: svjetlo, toplinu, mehanički ili kemijski oblik.

Toplinom se služimo da prostore za život i rad učinimo primjerenijim čovjeku u hladnim klimatskim razdobljima, da pripremamo jelo i udovoljimo higijenskim potrebama, te u brojnim tehnološkim procesima (npr. pri kovanju, lijevanju, kaljenju, sušenju, pečenju, kemijskim i biološkim procesima koji se odvijaju uz dovođenje topline itd.).

Mehaničku energiju vjerojatno najlakše i najtočnije poimamo. Stoga što za korištenje mehaničkom energijom znamo u primjerima gdje se može koristiti i neposredan rad ljudskih mišića: za premještanje, podizanje-spuštanje tereta, transportiranje na neku udaljenost, obradu materijala skidanjem strugotine, savijanjem, kovanjem, prešanjem itd. Mehanička se energija 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 domaćinstvu, industriji i građevinarstvu, poljoprivredi, prometu...

Svjetlo je energetski oblik kojim se služimo za osiguranje vidljivosti u vrijeme i na mjestima bez prirodna Sunčeva zračenja. Danas se gotovo isključivo osigurava preobrazbom električne energije. U energetskim razmatranjima danas je uobičajeno energiji, iskorištenoj u obliku svjetla, dodati i energiju iskorištenu za baratanje informacijama (telefon, telegraf, radio, televizija, audio-vizualni uređaji, računala).

Kemijskom energijom koristimo se npr. u visokim pećima za proizvodnju sirovog željeza, u elektrolučnim pećima za proizvodnju ferolegura i karbida, u elektrolitičkim kadama za proizvodnju aluminija i sl. U svim tim primjerima uložena energija iskorištena je za formiranje kemijski nove korisne tvari iz prethodno raspoložive drukčije tvari.

Energija je sposobnost obavljanja rada. Ne dâ se ni iz čega stvoriti niti uništiti. Čovjek je svjestan njezina prisustva 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.

Primarno energija je u tvarima: u Zemlji i njezinu okolišu (ugljen, nafta, prirodni plin, nuklearno gorivo, vodne i zračne mase), u energetskoj aktivnosti materije Sunca, te u gravitacijskom djelovanju masa Zemlje, Sunca i Mjeseca. Da bismo je iskoristili, moramo te tvari steći, prikupiti, pribaviti i dovesti ih energetskim uređajima ili te uređaje izložili njihovu djelovanju. To je predmet opskrbe energijom.

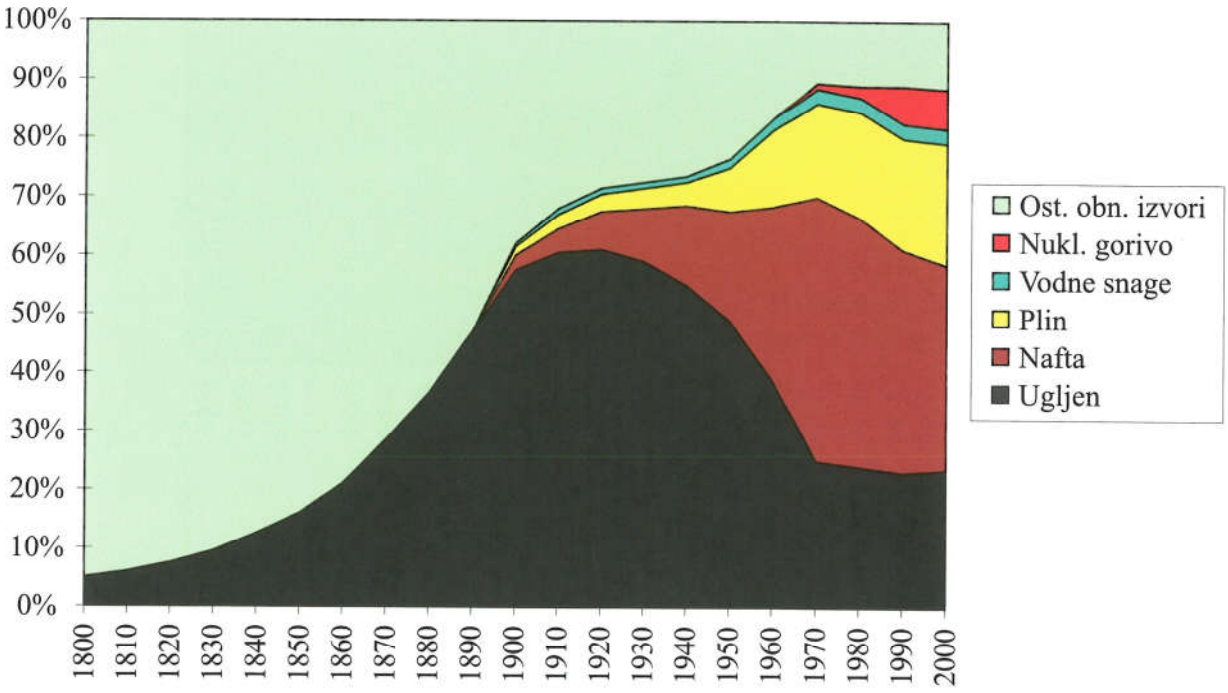
Svi energetski procesi, kojima smišljeno upravlja čovjek, zbivaju se tako da se energija sadržana u nekom izvoru energije, tijekom jedne ili više pretvorbi (promjena, preobražaja, transformacija) njezina oblika, usmjeri prema potrebnoj svrsi. Pri tome se veći ili manji dio početne energije pretvori u drugi oblik, usmjeri na drugo mjesto ili se – zbog prirodnih razloga – ne dade iskoristiti. Štoviše, iskorištena 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.

Ono što uobičajeno nazivamo proizvodnjom nekog oblika energije, zapravo je: (a) pridobivanje, stjecanje nekog prirodnog izvora energije, primarnog oblika energije (kažemo primjerice: proizvodnja ugljena, a svjesni smo da je to zapravo pridobivanje ugljena) ili (b) transformacija nekog energetskog oblika u drugi (npr. kada energiju sadržanu u ugljenu višekratnom pretvorbom pretvaramo u električnu energiju, što se zbiva u termoelektrani, tada govorimo o proizvodnji električne energije). Ono što najčešće nazivamo 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) nazivamo gubicima energije, dio je uložene energije u energetski proces koji nije iskorišten na poželjan način. Prijenos energije je transport nekog energetskog oblika na potrebnu – ponekad i vrlo veliku – udaljenost, a distribucija energije je raspodjela do svakog korisnika. Neposredno (finalno) iskorištena energija je ona energija koja se iz energetskog gospodarstva predaje na korištenje. Korištenje energijom je konačna pretvorba nekog oblika energije u koristan oblik, koja se odvija kod potrošača.

U energetske bilance ne uvrštava se energija koju čovječanstvo uzima u hrani, niti pasivno iskorištena energija Sunčeva zračenja koje se iskorištava fotosintezom u šumarstvu i poljoprivredi ili za prirodno zagrijavanje, te osvjetljenje ambijenta u kojem se čovjek kreće, živi i radi. Međutim, energetska razmatranja uobičajeno obuhvaćaju tzv. neenergetsku potrošnju onih oblika energije koji se koriste kao sirovina u petrokemijskoj ili karbokemijskoj industriji, dakle u industriji koja koristi ugljen, naftu ili prirodni plin kao svoju sirovinu. Ugljen je neizbježan kao kemijska sirovina, jer u obliku koksa sudjeluje u redukciji željezne rudače.

Do početnih sedamdesetih godina prošlog stoljeća (svjetska naftna kriza), u svijetu smjenjuje se samo pretežni oblik opskrbe energijom (slika 1.1), ali korištenje energijom neprestano raste (slika 1.2).

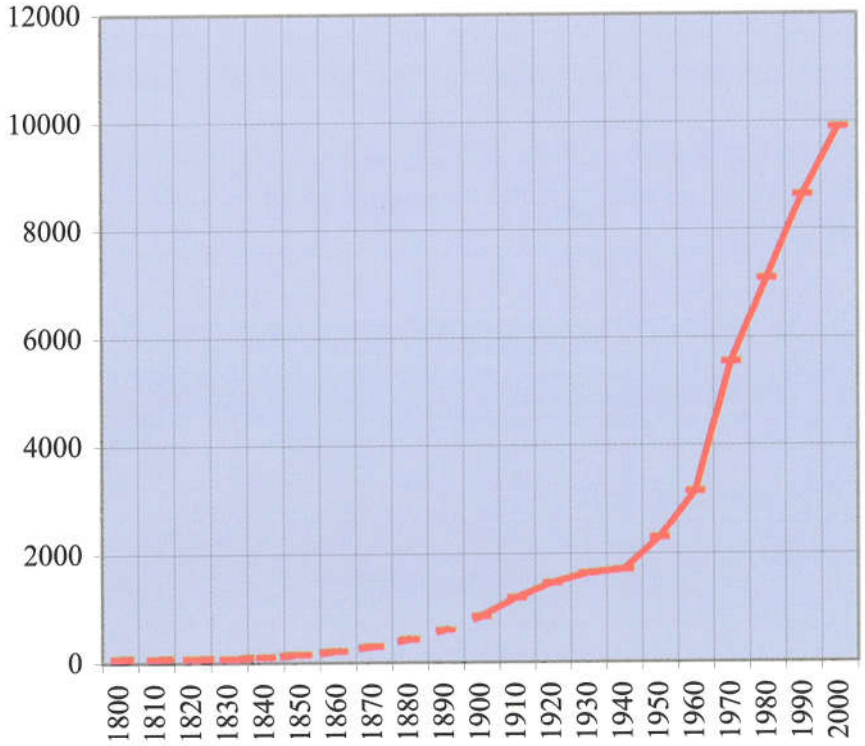


Slika 1.1. Udjeli oblika energije u primarnoj energiji svijeta

Ugljen početkom industrijske revolucije smjenjuje ogrjevno drvo, sredinom prošlog stoljeća glavninu potreba namiruje nafta, uz porast potrošnje prirodnog plina i nuklearnog goriva. Sve donedavna, u pravilu se određen rast društvenog proizvoda ostvarivao vrlo određenim rastom korištenja energijom, naglašenijim u slabo razvijeniim zemljama. Od sredine sedamdesetih godina prošlog stoljeća, brojne su zemlje u svijetu (osobito razvijenije) u kojima se rast društvenog proizvoda ostvaruje uz sporiji rast korištenja energijom.

U posljednje vrijeme širi se i spoznaja o nemogućnosti pridobivanja, pretvorbe, prijenosa energije i korištenja njome bez stanovitog opterećenja okoline, kao i o nužnosti da se – uz povećanu cijenu i druge napore – to opterećenje učini razumnim.

U vremenu koje je pred nama doći će do iscrpljenja najprije preostalih zaliha nafte i prirodnog plina, a potom i ugljena. Osiguranje novih izvora energije postat će glavnim tehnološkim izazovom čovječanstva, jer se s dovoljnim količinama energije mogu namiriti rastuće potrebe za pitkom vodom, čistim zrakom i hranom, te potrebe za recikliranjem svekolikih sirovina, dakle ponovnog njihova korištenja nakon što su jednom izuzete iz prirode.



Slika 1.2. Potrošnja primarne energije u svijetu (Mtoe)

2

Svjetska energetika na prijelazu tisućljeća

Kretanja u posljednjih trideset godina, od svjetske energetske krize do danas, prikazat ćemo podacima kako ih donosi Međunarodna agencija za energiju, IEA[1]. Izaberimo samo one podatke koji se odnose na *ukupnu potrošnju primarne energije*[2], te na ukupnu neposrednu, *finalnu potrošnju energije*[3] i na električni udio u toj finalnoj potrošnji. Finalna potrošnja, utvrđuje se kada se od ukupne potrošnje primarne energije odbije *vlastita potrošnja*[4] energije energetske privrede i gubici energije pri transformacijama oblika energije, te pri njezinom prijenosu i distribuciji.

U svijetu, gdje danas živi više od šest milijarda ljudi (2003. godine: 6268 milijuna) i u kojem se čak dvije milijarde ljudi ne služi blagodatima električne energije, a oko 800 miljuna 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 udvostručavala ukupna potrošnja primarne energije, za posljednjih 30 godina od tada ta se potrošnja povećala samo 1,75 puta (1973–2003). To je važno postignuće svjetske energetike, nakon signala o energetskoj ograničenosti i ograničenosti svekolikih prirodnih resursa, koji signali su kulminirali 1973. i ponovno 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: 10579 Mtoe[5]) primarne energije, dakle oko 1,7 tona ekvivalentne nafte po prosječnom stanovniku svijeta (slika 2.1).

Zemlje OECD[6]-a u tom uspjehu participirale su i nešto više. U tim zemljama ostvareno je još umjerenije povećanje ukupne potrošnje primarne energije u istom razdoblju: 1,43 puta (1973–2003). Kada se ima na umu da je njihov udio u primarnoj potrošnji svijeta oko polovina (točno 51 posto, 2003), a udio u svjetskom stanovništvu više od jedne šestine (točno 18,4 posto, 2003), onda se dade zaključiti da – doduše presporo i preslabo – raste spoznaja razvijenoga svijeta o potrebi i nužnosti umjerenije ukupne potrošnje u korist zemalja u razvoju i nerazvijenih. Udio OECD-a u ukupnoj primarnoj potrošnji svjetske energije bio je 1973. godine 62 posto. Najveći doprinos susprezanju, odnosno efikasnijem iskorištenju energije dale su zapadnoeuropske razvijene zemlje, dok su neeuropske zemlje OECD-a povećale svoj udio unutar OECD-a.

---

[1] Svi svjetski podaci iznose se ovdje prema Key World Energy Statistics 2005, IEA (International Energy Agency)

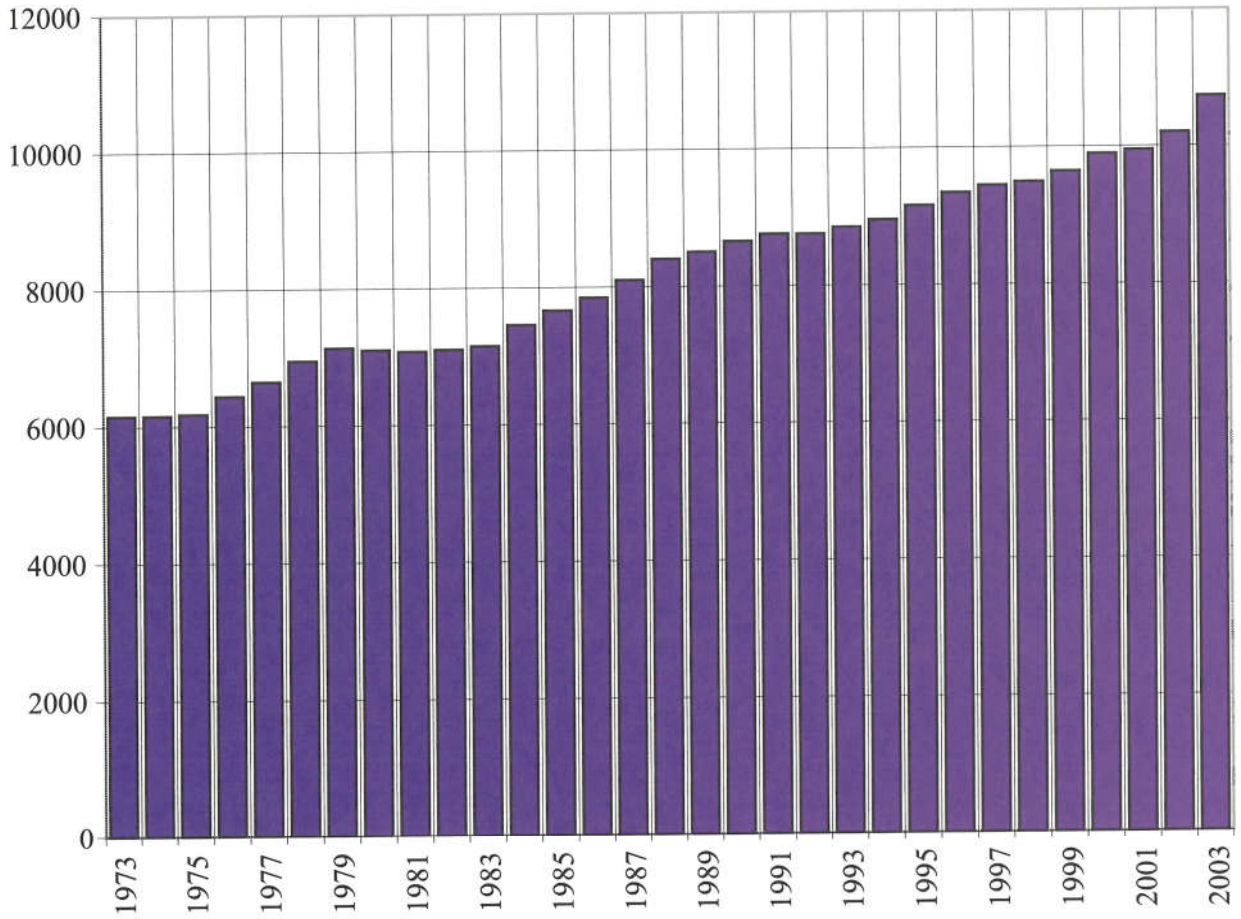
[2] TPES = Total Primary Energy Supply (engl.). U ovoj i mnogim idućim natuknicama, dat će se nazivi temeljnih pojmova na engleskom, ponekad i na njemačkom, kako bi se osiguralo razumijevanje naziva tih pojmova i na tim jezicima. Naročito se to odnosi na brojne akronime (kratice načinjene od početnih slova) iz engleskog strukovnog jezika, koje se znaju koristiti dosta često i u tekstovima na hrvatskom.

[3] TFC = Total Final Consumption (engl.)

[4] energy sector own use (engl.)

[5] 1 Mtoe (milijun tona ekvivatentne nafte) = 41,87 PJ (1 petadžul = 10^{15} džula)

[6] 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.



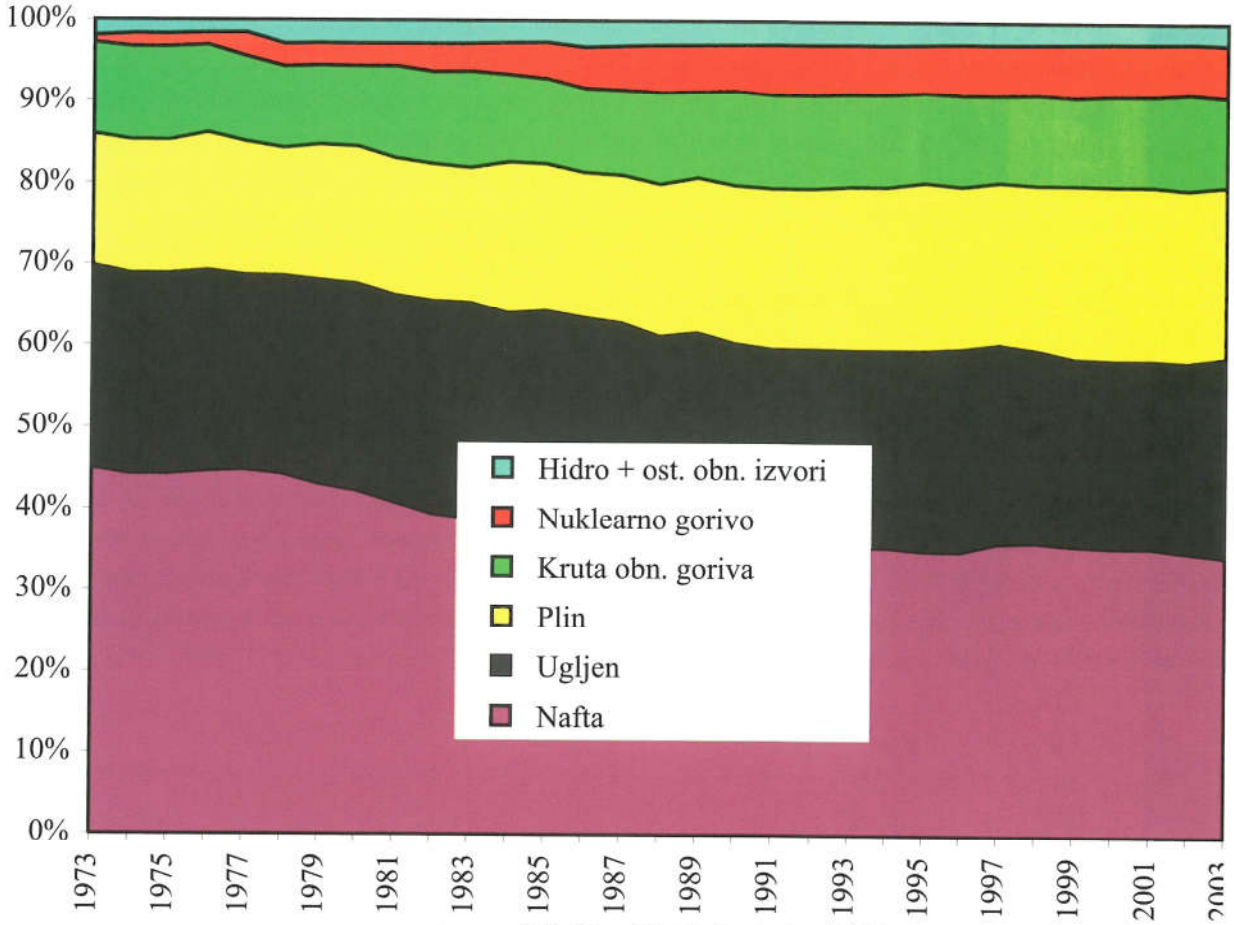
Izvor: IEA-Key World Statistics 2005

Slika 2.1. Ukupna potrošnja primarne energije u svijetu (Mtoe)

Udio nafte u energetskoj opskrbi svijeta smanjen je doista drastično, s 45 posto (kolik je bio 1973. godine) smanjen je na 34,4 posto u 2003. godini (slika 2.2). Na račun – uglavnom – ostvarenog gotovo nevjerojatnog povećanja udjela korištenja nuklearnim gorivom (s 0,9 posto na početku tog razdoblja povećao se na 6,5 posto krajem tog razdoblja) te povećanja udjela korištenja prirodnim plinom (s 16,2 na 21,2 posto). Proizvodnja je električne energije iz nuklearnih elektrana u tom razdoblju povećana 13 puta! Korištenje ugljenom praktički je ostalo na približno ¼ udjela u energetskoj opskrbi u svijetu, korištenje vodnim snagama nešto se povećalo (s 1,8 na 2,2 posto, više je nego udvostručena proizvodnja električne energije iz hidroelektrana), a korištenje obnovljivim gorivima (karakteristično za nerazvijeni dio svijeta; životinjski ekskrementi, slama, ogrjevno drvo i otpaci) ostalo je na istoj razini, oko 11 posto. Konačno, bitno je uvećan – doduše apsolutno malen – udio korištenja ostalim obnovljivim izvorima: geotermalnom, Sunčevom i energijom vjetra, s 0,1 porastao je na 0,5 posto.

U ukupnoj neposrednoj, finalnoj potrošnji energije u svijetu došlo je do povećanja od 1,58 puta (1973–2003). Dakle, više se povećala primarna potrošnja od finalne, došlo je do pogoršanja totalnog stupnja djelovanja[7] svjetskog energetskog sustava (s oko 76 posto pao

[7] Totalni stupanj djelovanja energetike je omjer ukupne finalne potrošnje energije, dakle energije koja je izašla iz energetskog sektora, i ukupne potrošnje primarne energije, dakle energije koja je ušla u energetski sektor.



Slika 2.2. Udjeli oblika energije u primarnoj energiji svijeta

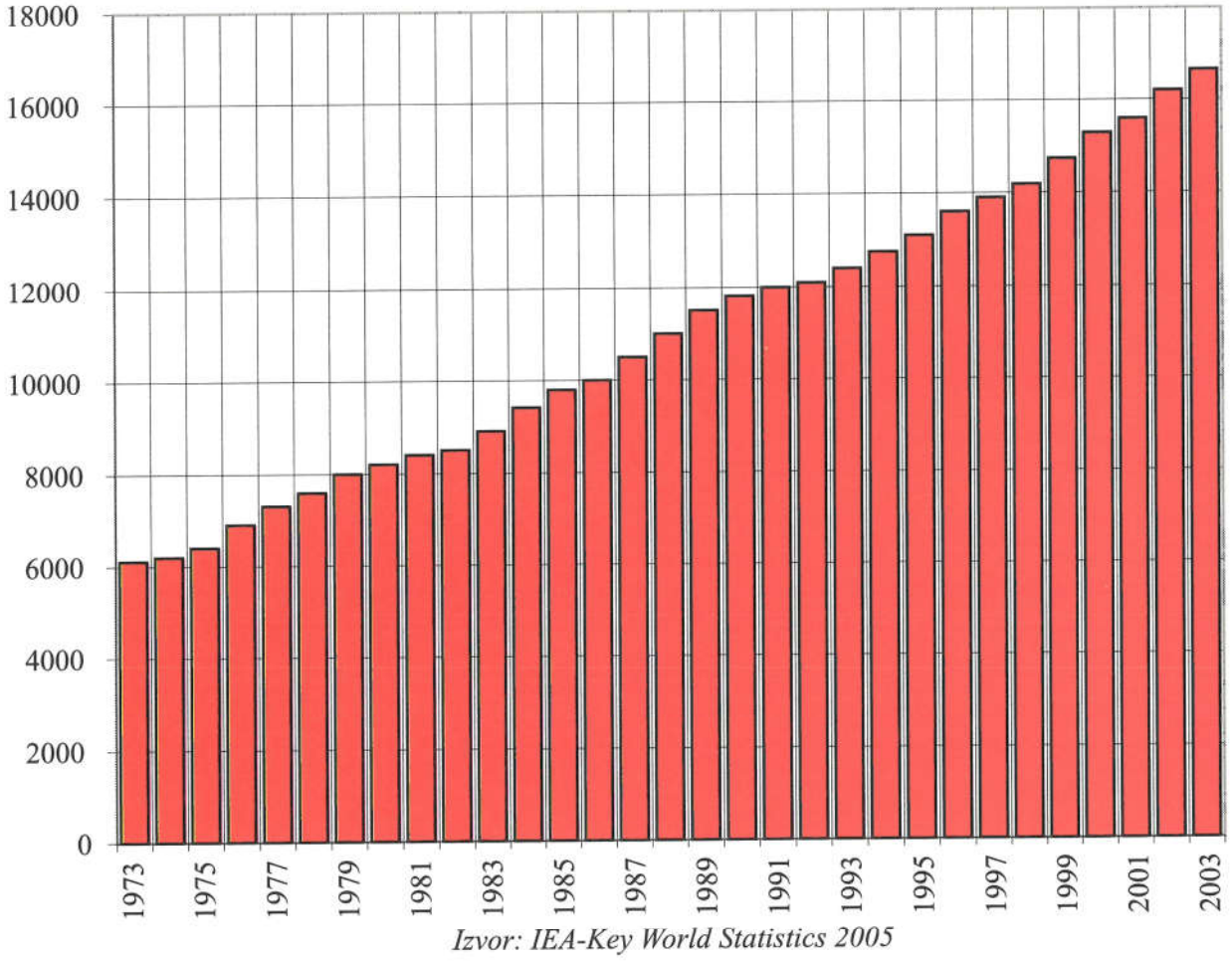
je na 69 posto). Dakle, više se posezalo – u prosjeku – za neefikasnijim energetskim rješenjima nego li za efikasnijim, usprkos neprestanim nastojanjima. Udio se električne energije u finalnoj potrošnji energije svijeta povećao s 9,5 posto (1973) na 16,1 posto (2003) i to je *najveća strukturna promjena u finalnoj potrošnji* u tom razdoblju! Kako je prosječni stupanj djelovanja transformacije primarnih oblika energije u električni oblik još uvijek vrlo nepovoljan (približno 35 posto), takvo je povećanje udjela električne energije u finalnoj 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 finalnim oblicima, jer još nije došlo do radikalne supstitucije derivata nafte drugim oblicima energije, u cestovnom, brodskom i avionskom prometu. Udio ugljena se 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 finalnom 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 – netransformiran u elektriku – bolje iskoristiti za neposredno izgaranje u ložištima kao izvor topline. Tehnološke i životne potrebe čovječanstva za toplinom iznose preko 50 posto finalne 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 finalne energije 1,58 puta, u

istom razdoblju (1973–2003) proizvodnja električne energije porasla je 2,73 puta! Ukupna svjetska proizvodnja na prijelazu tisućljeća (2003) je 16661 teravatsat (slika 2.3)! Pored već spomenutog velikog povećanja proizvodnje u nuklearnim elektranama, došlo je do bitne preraspodjele između plina i nafte kao goriva u elektranama. Potrošnja nafte kao goriva u elektranama smanjena s oko 25 (1973) na samo 6,9 posto (2003), dok je potrošnja plina kao goriva porasla je s 12 posto na 19,4 posto. Udio ugljena kao gorivo za elektrane s 38 posto porastao je na 40 posto.

Za svijet je prosječna godišnja finalna potrošnja električne energije po stanovniku oko 2400 kWh (2003), u zemljama OECD-a to je nešto više od 8000 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 prosječno oko 6000 kWh.

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



Izvor: IEA-Key World Statistics 2005

Slika 2.3. Proizvodnja električne energije u svijetu (TWh)

Gdje je u takvome svijetu naša Hrvatska?

Najprije, predstavljamo 0,71 promila svjetskog stanovništva. Prema ukupnoj potrošnji energije, 2003. godine koristimo 0,83 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.

O detaljnijim energetskim pokazateljima za Hrvatsku raspolažemo uređenim podacima za razdoblje 1990–2003[8]. Ukupna potrošnja primarne energije smanjena je u promatranom 13-godišnjem razdoblju, nakon prve ratne godine na najnižu razinu 1992. godine, da bi od tada porasla na razinu 367 petadžula (PJ[9]) (2003), još uvijek nešto nižu od prijeratne (386 PJ, 1990)[10] (slika 2.4). Domaće pridobivanje nafte smanjeno je u tom trinaestgodišnjem razdoblju na 42 posto (100 posto = pridobivanje u 1990), a domaće pridobivanje prirodnog plina neznatno je poraslo, za 3,4 posto prema 1990. godini, čime je hrvatska *uvozna ovisnost* prešla 50 posto, povećala se na 52,5 posto u 2003. godini, spram 43,3 posto u 1990. godini.

Finalno korištenje energijom također nije dostiglo prijeratnu razinu: 2003. godine bilo je 248 PJ a 1990. godine ostvareno je 258 PJ (slika 2.5). Udio tekućih goriva u finalnoj potrošnji je 49 posto, veći je od prosječnog svjetskog udjela – znak da neracionalno i rastošno koristimo prijevozna sredstva.

Korištenje vodnim snagama ovisilo je samo o ostvarenim godišnjim hidrološkim prilikama, nijedna nova hidrelektrana nije u tom razdoblju izgrađena – kao ni mnogo godina prije toga. Prosječni godišnji udio hidroelektrana u ukupnoj proizvodnji električne energije u Hrvatskoj je nešto niži od 50 posto (slika 2.6). U namirenju ukupne potrošnje električne energije njihov je udio 40-tak posto jer se godišnje 20-30 posto električne energije uvozi (slika 2.7).

Udio je električne energije u finalnoj potrošnji preko 19 posto, a to je više no za prosječan svijet – isto toliki udio kao mi prosječno ostvaruju razvijenije zemlje Europske Unije. Pitanje je da li je primjereno dostignutom našem ukupnom razvojnom stupnju toliko korištenje najplemenitijim energetskim oblikom, ili bi bilo primjereno manje. Koristimo 3154 kWh električne energije po stanovniku (2003), a ukupne primarne energije oko 2 tone ekvivalentne nafte po stanovniku godišnje.

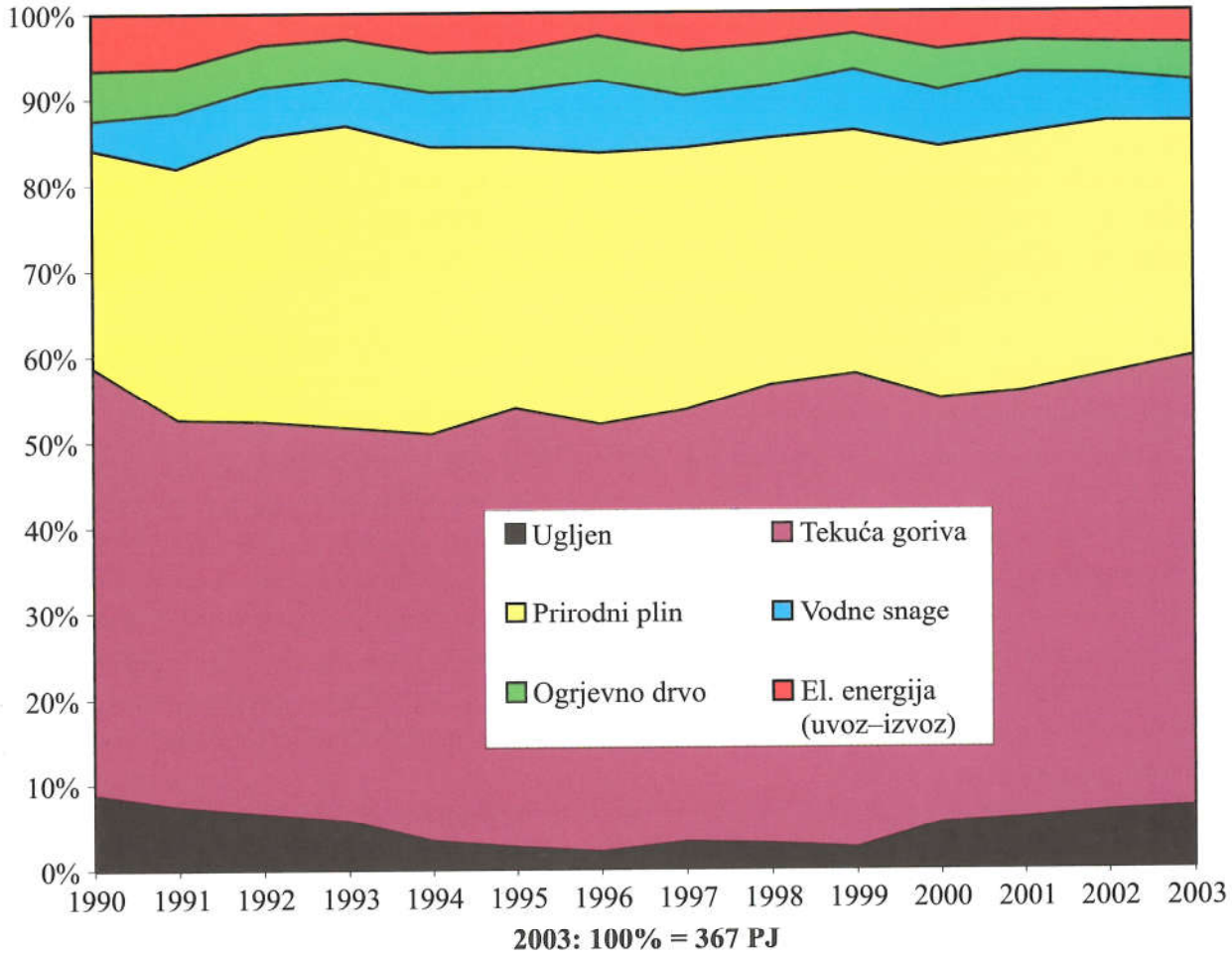
Konačno, po prosječnom stanovniku Hrvatske, iz sektora energetike emitira se 4,7 tona ugljikova dioksida (2003), što je više od svjetskog prosjeka, upravo toliko koliko je i hrvatska potrošnja energije po stanovniku veća od prosječne svjetske. Zahvaljujemo to – prije svega – visokom korištenju vodnim snagama (4,8 posto u primarnoj potrošnji spram svjetskih 2,2 posto, 2003. godine, ili 8,4 posto spram svjetskih oko 2,3 posto, 1996. godine – ta je godina bila u nas osobito vlažna).

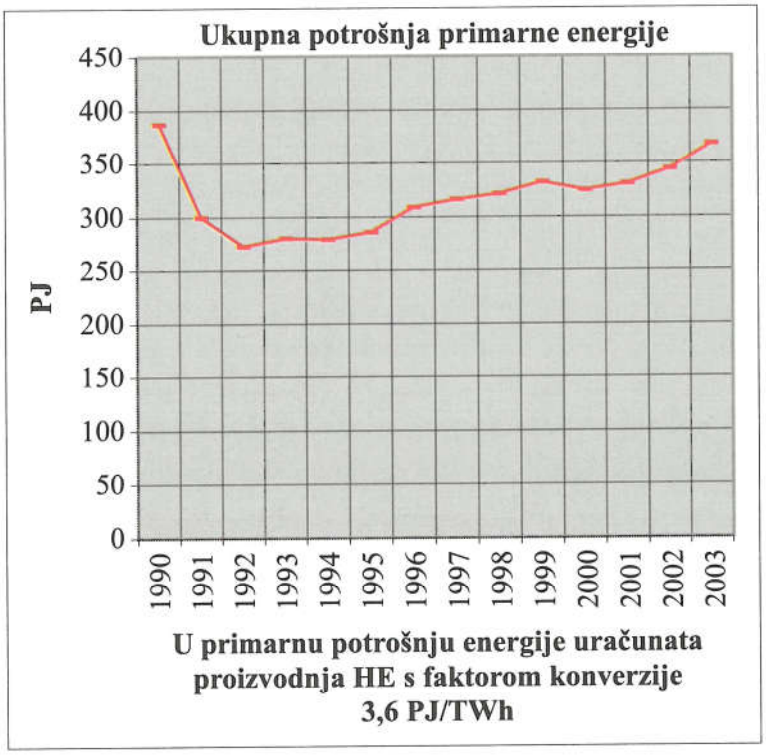
---

[8] Izvor podataka za Hrvatsku je Energija u Hrvatskoj 2003. Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva

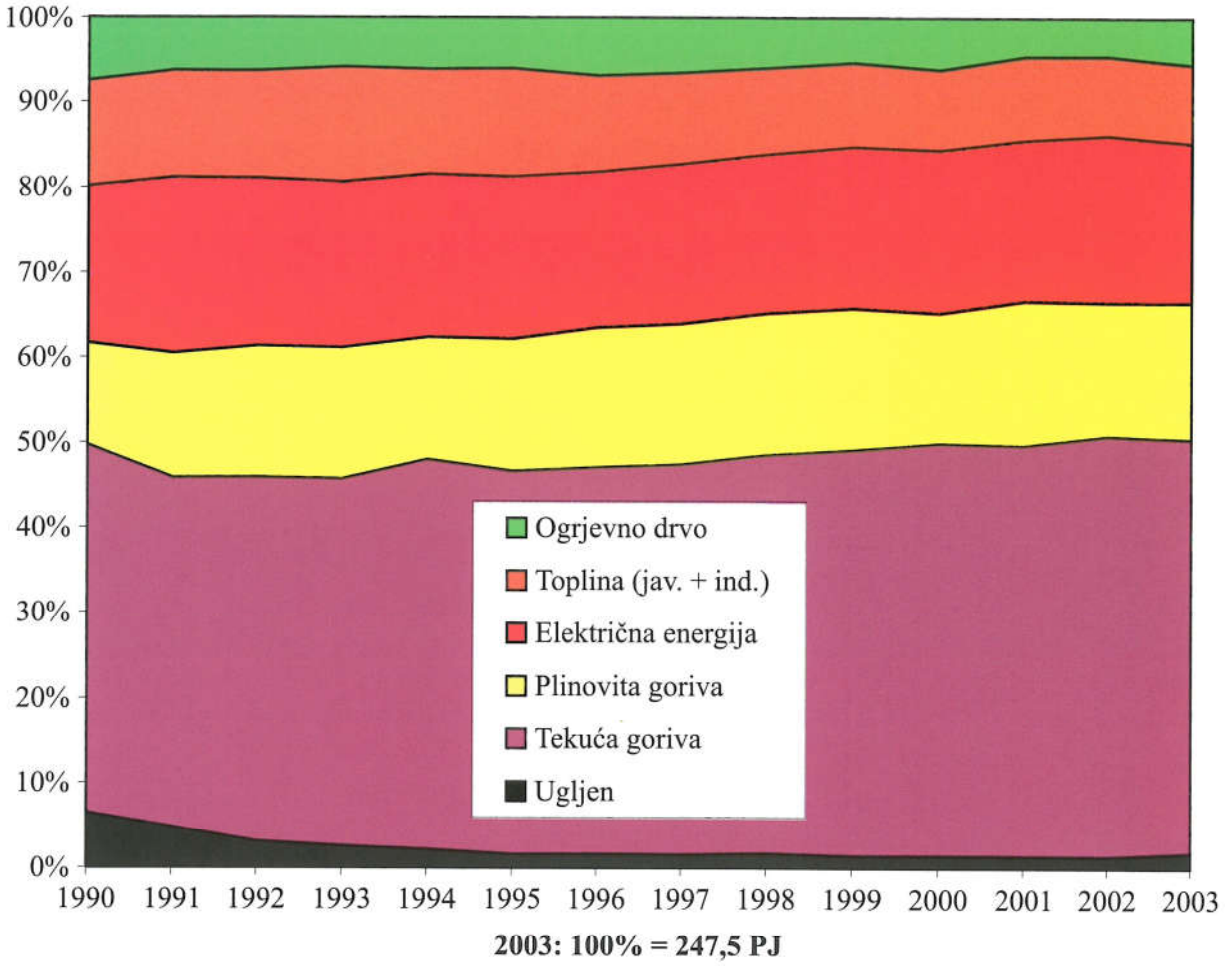
[9] 1 petadžul (PJ) = 10^{15} džula (J)

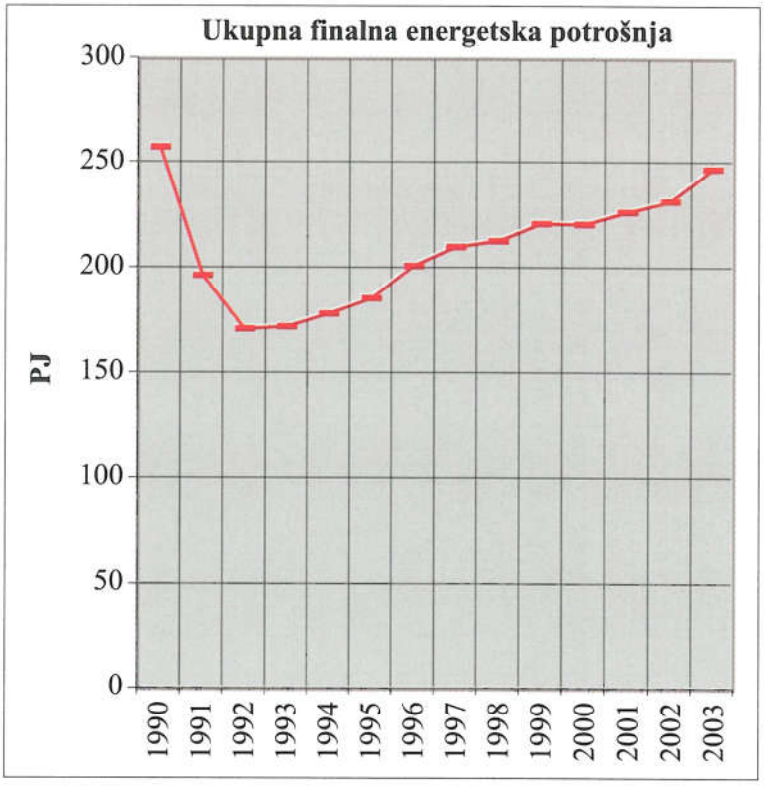
[10] Računato s faktorom konverzije proizvodnje električne energije hidroelektrana u primarnu energiju vodnih snaga od 3,6 PJ/TWh – sukladno europskim/svjetskim statistikama; za razliku od citiranog izvora podataka, koji računa s faktorom ~10 PJ/TWh



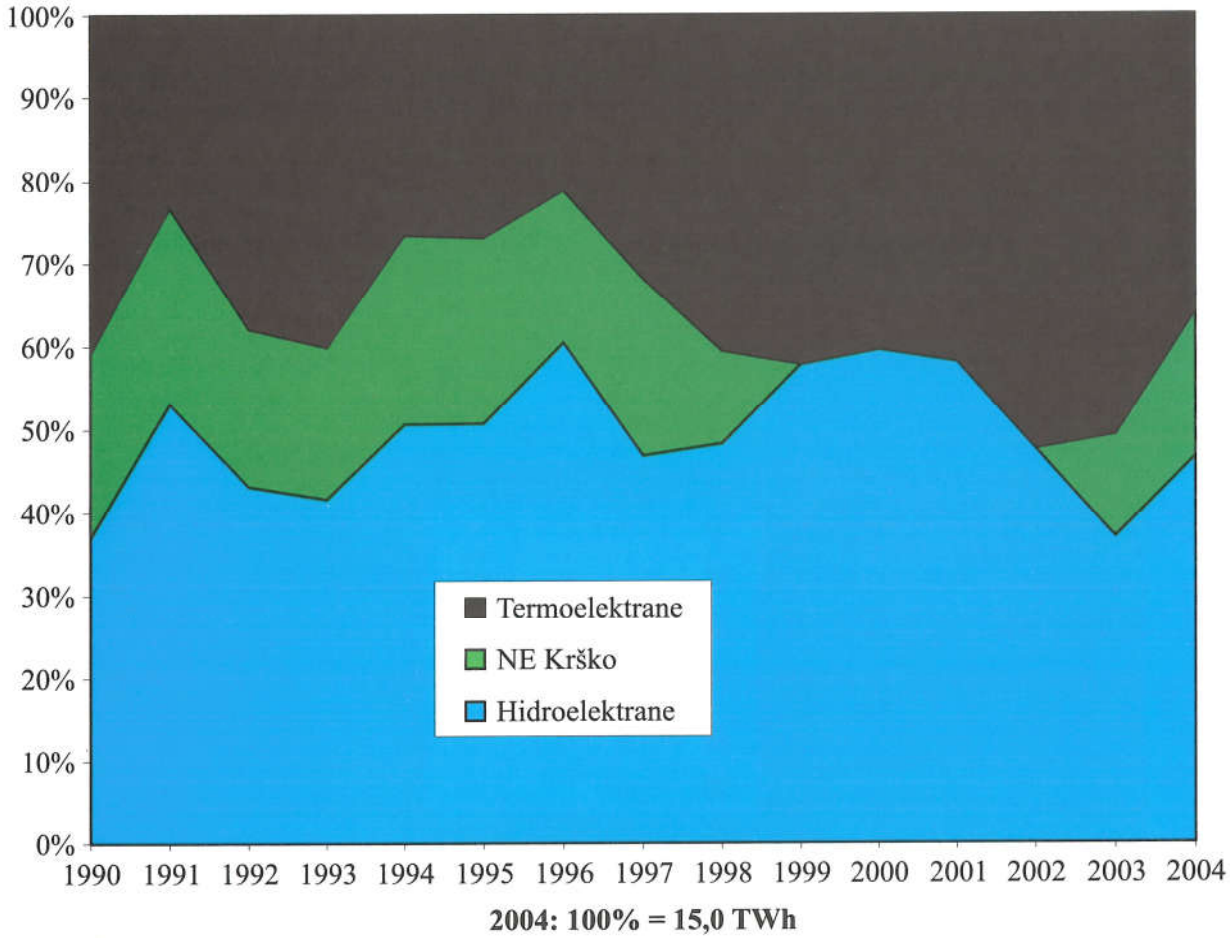


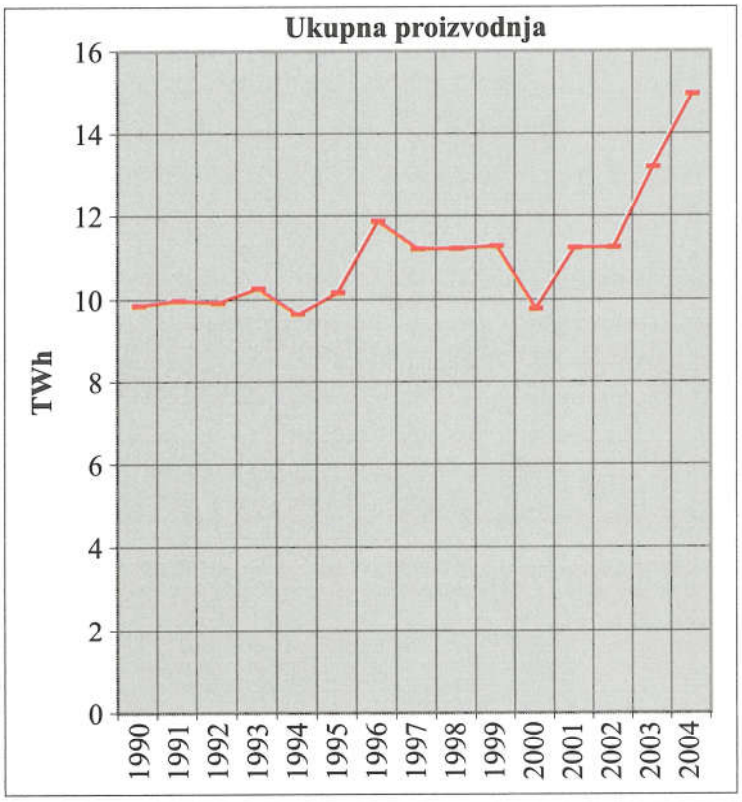
Slika 2.4. Udjeli oblika energije u ukupnoj potrošnji primarne energije u Hrvatskoj



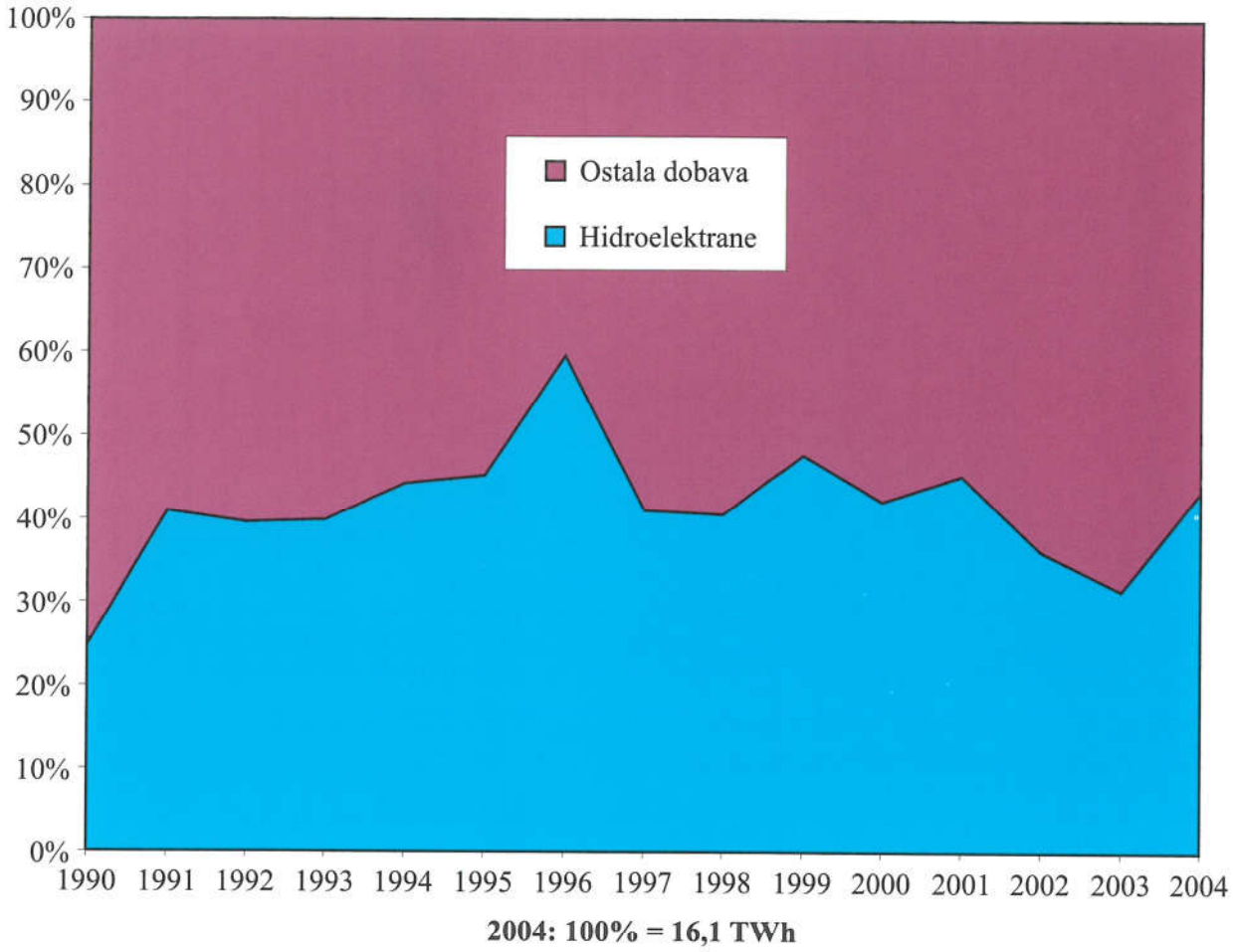


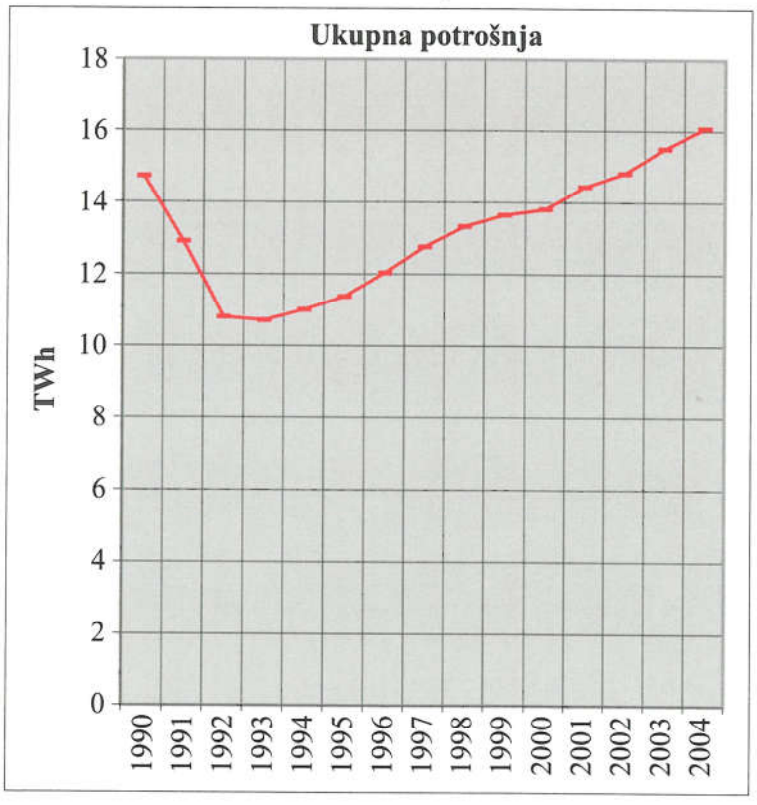
Slika 2.5. Udjeli oblika energije u finalnoj energetskoj potrošnji energije u Hrvatskoj





Slika 2.6. Udjeli elektrana u proizvodnji električne energije u Hrvatskoj





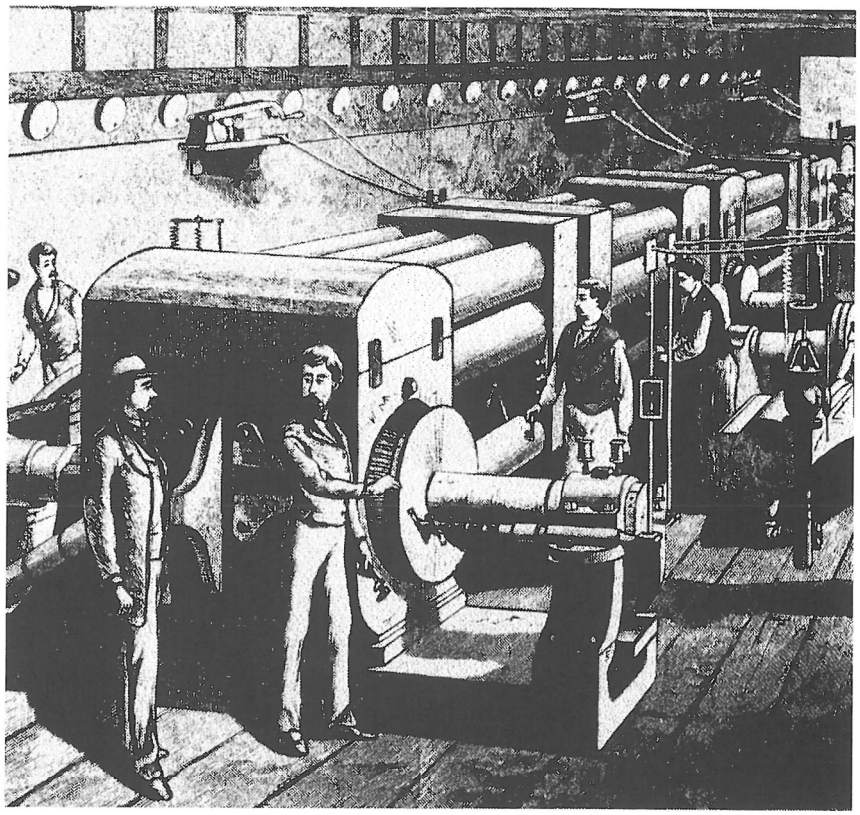
Slika 2.7. Udjeli hidroelektrana u namirenju ukupne potrošnje električne energije u Hrvatskoj

3

Povijesni put svjetske javne elektrifikacije

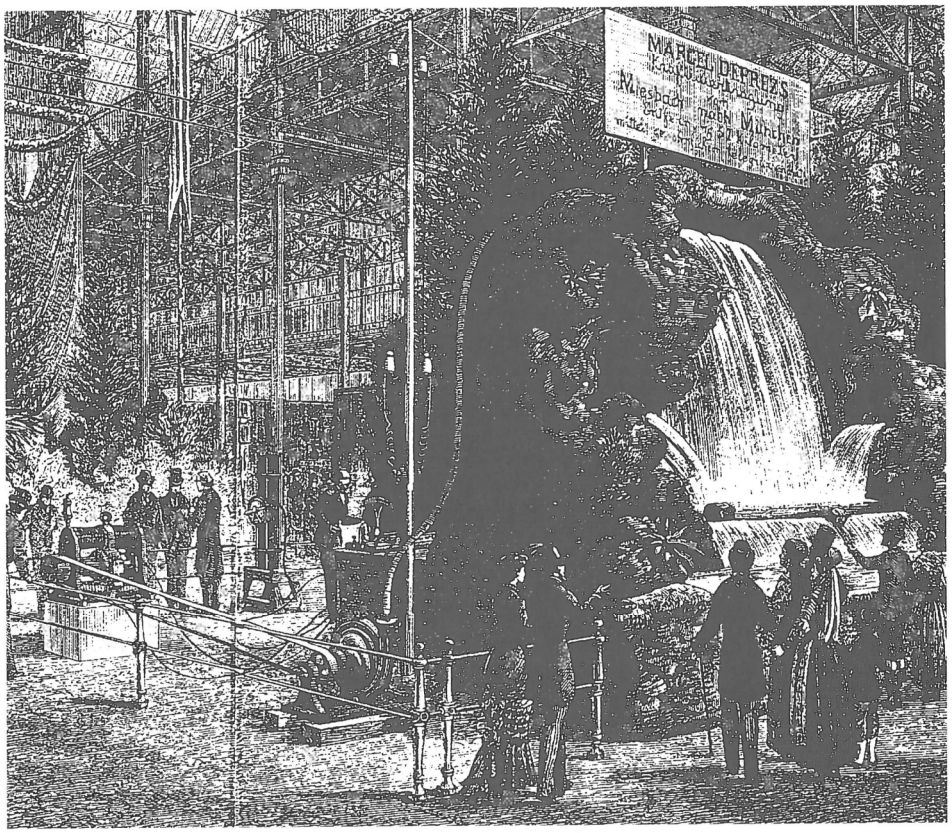
Civilizacijski čovjekov put, osvjetljen je posljednjih više od stotinjak godina električnog svjetla sjajem...

Prve javne elektrane[11], 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 (slika 3.1). To su bile elektrane istosmjerne struje, iz kojih se električna energija distribuirala na neveliku okolnu udaljenost. Time je označen kamen temeljac na putu svjetske javne elektrifikacije. Eksplozija koja će uslijediti bila je neizbježna; jedna su dotadašnja otkrića jedva dočekala masovniju primjenu, a druga su se naprosto množila – kako na strani dobave električne energije, tako i na strani njezina korištenja. Iste godine (1882), izveden je i prvi svjetski prijenos istosmjernom strujom na udaljenost 57 kilometara (Miesbach–München) (slika 3.2).



Slika 3.1. Edisonova elektrana u New Yorku, 1882.

[11] Ovdje je primjenjena sintagma *javne elektrane,* a dalje će biti upotrebljena i sintagma *javna elektroprivreda.* Dakako, danas je elektroprivreda a priori javna, te 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.



Slika 3.2. Demonstracija električnog prijenosa umjetnim vodopadom na Elektrotehničkoj izložbi u Münchenu, 1882.

U prvom desetljeću javne elektrifikacije svijeta, osamdesetih, 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 izum asinkronoga, indukcijskog, elektromotora[12] (1883) koji jednostavnošću rješenja i izvedbe nema do danas premca među svim motorima, izum transformatora (1882, odnosno 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.

[12] 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 sagorijevanjem, koji ima barem stotinjak vrlo složenih i potrošljivijih dijelova!

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. Slijedi 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 prijenos s mjesta na kojima se električna energija može prikladno proizvesti, u hidroelektranama i termoelektranama, na 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 elektronergetski *otoci*, u kojima sada već sinkrono radi više elektrana, koje kombiniranjem angažmana svojih raspoloživih mogućnosti opskrbljuju potrošače na obuhvaćenom području.

Dvadesetih-tridesetih godina prošlog stoljeća, u Europi i u Americi, razvijaju se već veliki elektroenergetski sustavi u kojima se naglašeno koriste prijenosni vodovi za jednu karakterističnu pogonsku i ekonomsku svrhu. Svrha je, 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 a srazmjerno tome smanji angažman ili čak obustave termoelektrane. I obrnuto. Također, kada je jedna elektrana neraspoloživa, da je omogućena opskrba iz drugih, ma koliko bile udaljene. Takav sustav nastaje primjerice u Njemačkoj, između sjevernih područja s termoelektranama i južnih područja pretežno s hidrolektranama. 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, te se već 1921. godine osniva CIGRE[13], Međunarodno vijeće za velike elektroenergetske sustave, do nedavna Međunarodna konferencija za velike električne mreže visokog napona, sa sjedištem u Parizu[14].

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 ukupno u svijetu bilo stotinjak takvih prijenosa.

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

---

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

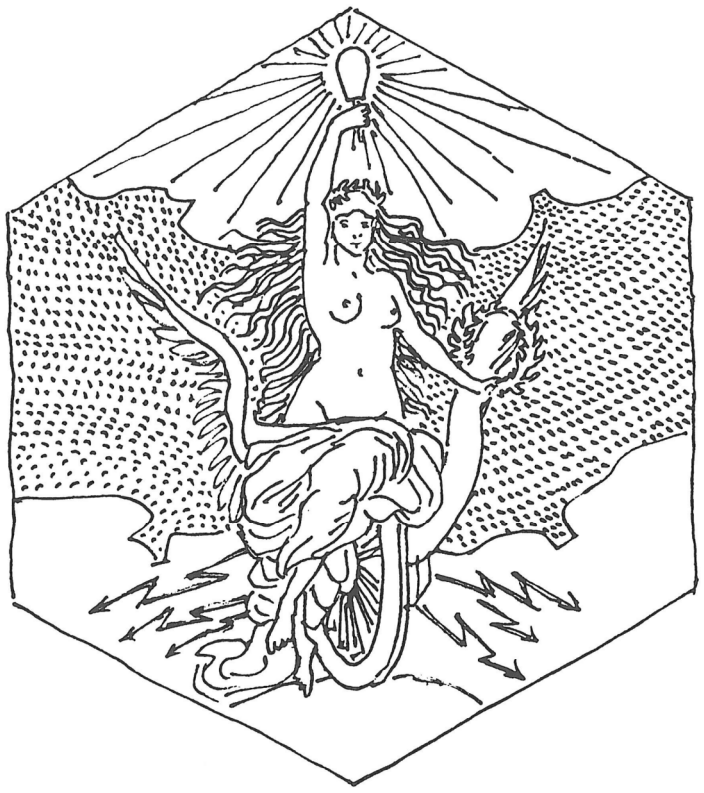
[14] CIGRÉ ima doista zavidnu tradiciju, a danas ima nacionalne ogranke u 80 zemalja. Članice su elektroprivredna i proizvodna poduzeća te znanstvene i izobrazbene institucije iz sektora elektroenergetike. Stalno funkcionira 16 studijskih odbora CIGRE i brojne radne grupe tih odbora. Od osnutka, 1921.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

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 1200 MVA, što vodi tada najvećoj naponskoj stepenici – reda 750 kV, da bi sredinom osamdesetih u tadašnjem Sovjetskom Savezu otpočelo korištenje prijenosnom linijom pod naponom 1150 kV. Teško je reći će kada hoće li uopće doći do daljnjeg povećanja izmjeničnog pogonskog napona.

Zaustavljanje nesmotrenog razvoja potražnje svekolike pa i električne energije, uopće usporavanje svekolikog ekstenzivnog rasta može voditi tome da do potrebe za još većim naponom niti ne dođe. Moguće da takvom kretanju pridonesu i novi prodori na području supravodljivosti (u vezi s prijenosom električne energije) i/ili na području pretvorbe energije u električni oblik (fuzijske nuklearne elektrane, neke druge nekonvencionalne elektrane).

Svjetlo, temeljni motiv početnoga razvoja

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 se eventualno lakše moglo *proći* kroz dosadašnju povijest. Elektrika je postupno 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.



Slika 3.3. Znak elektroprivrednog poduzeća BEWAG, Berlin, 1886.

Slika 3.4. Reklamni plakat iz razdoblja početka javne elektrifikacije.

Veoma su razgovjetne i poruke iz područja likovnog izražaja u vremenu svjetskih početaka javne elektrifikacije. Simboli prvih javnih elektroprivrednih poduzeća izdvajaju svjetlo, mehaničku silu i kretanje, kojih je novo izvorište elektrika. Lovorov vijenac za pobjedu nad mrakom i udaljenostima. Reklamni plakat iz toga doba sugerira električno svjetlo kao sjaj, izvor ugodnijeg i kulturnijeg života, elegancije, stila – skoro nadahnuća (slike 3.3. i 3.4).

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. Električno svjetlo je najvjerojatnije najsnažnijim početnim poticajem i nezaobilaznim trajnim postignućem javne elektroprivrede. Već 1849. primjenjena 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 obveznim početnim korakom. Razvoj je danas dopro do žarulja s vrlo velikom životnom dobi i smanjenom potrošnjom ulazne električne energije po izlaznoj svjetlosnoj energiji, postupnim napuštanjem žarulja sa žarnom niti. Već od početka tridesetih primjenjuju se žarulje sa svijetlećim izbijanjem u plinu, a od 1960. godine halogene žarulje.

Termoelektrane, bitno određuju prilike u elektroprivredi

Polovinom prošlog stoljeća, udio električne energije proizvedene u hidrolektranama u ukupnoj proizvodnji svjetske električne energije čini već više od jedne trećine (1950. godine 35,8 %), da bi se u sadašnje vrijeme smanjio na šestinu-sedminu (16 %), uz tendenciju daljnjeg smanjenja. Stoga energetsko-tehnička rješenja u termoelektranama najsnažnije određuju ukupne energetsko-ekonomske prilike u čitavoj elektroprivredi.

Od početka stoljeća primjenjuju se parne turbine kojima stupanj djelovanja postupno raste primjenom sve viših parametara ulazne pare (temperature i tlaka), što dakako ograničavaju mogućnosti materijala za konstrukciju kotlova i turbina. Poboljšanja u kotlovima postizana su što potpunijim sagorijevanjem goriva. Plinske turbine koriste neposredno plinove izgaranja goriva (izostaje primjena parnog kotla i manipulacija vodom i parom), ali izlazni plinovi imaju relativno visoku temperaturu te odnose sadržanu energiju u okolinu. Povećanje ukupnog iskorištenja goriva postizano je *kombiniranom proizvodnjom električne energije i topline*[15] (kogeneracija), u termoelektranama-toplanama. Posljednjih više od dvadeset godina u primjeni su *kombi-elektrane*[16], koje su kombinirane iz plinskog agregata kojega se plinovi izgaranja koriste za proizvodnju pare, koja pokreće parni turboagregat.

Utjecaj veličine agregata i tehničkog rješenja termoelektrane na mrki ugljen najbolje opisuje ostvareni stupanj djelovanja. Turboagregati 100–150 MW su početkom šezdesetih ostvarivali stupanj djelovanja 31 posto, jedinice od 300 MW početkom sedamdesetih 35 posto, a 600 megavatne jedinice koncem osamdesetih 37 posto. Kombi-elektrana s uplinjavanjem ugljena početkom devedesetih postiže oko 40 posto. Današnja ostvarenja stupnja djelovanja u plinskoj kombi-elektrani su iznad 50 posto.

Godine 1951. u Europi se osniva UCPTE[17], Unija za koordinaciju proizvodnje i prijenosa električne energije između okupljenih zemalja i od 1958. godine francuska, njemačka i švicarska mreža u paralelnom su pogonu s koordinacijskim dispečerskim centrom u Laufenburgu. To se umnožava, kako u pogledu obuhvaćenih zemalja, tako i u pogledu broja takvih međunarodnih povezivanja.

Karakteristično je za posljednjih gotovo tridesetak godina da se pojedine zemlje oslanjaju na dugoročni uvoz velikih količina električne energije (primjer: Italija); istodobno druge na dugoročni izvoz (primjer: Francuska). Interes tih drugih zemalja je u ravnomjernijem korištenju svojim dakako bogatim elektranskim parkom, koji bi – bez te isporuke preko granice – morao raditi uz slabije energetsko i time ekonomsko iskorištenje. Interes prvih je ponajprije u manjem opterećenju okoline; dakako, moraju na područjima drugih svojih gospodarskih djelatnosti ostvariti inozemne prihode koji im to omogućuju.

U pogledu primarne energije, javna elektroprivreda slijedi opća svjetska kretanja, istodobno ih i sama presudno određujući. Elektroprivreda je omogućila masovno energetsko korištenje ugljenom, u svom početnom razdoblju. Omogućujući njegovo iskorištavanje bez transporta, ako je bio manjeg energetskog sadržaja, i bez opterećenja okoline na mjestu finalnog energetskog iskorištenja. Bez razvijene elektroprivrede ne bi uopće moglo doći do masovnog korištenja nuklearnom energijom, za koje je karakteristična potreba jake mreže (moguće korištenje relativno velikim agregatima) i što ravnomjernija i viša potražnja tije-

---

[15] combined head and power (engl.), KWK, Kraft-Wärme Kopplung (njem.)

[16] gas-steam power station (engl.), GuD, Gas- und Dampfturbinen Kraftwerk (njem.)

[17] Union pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Electricité (franc.)

kom vremena (što je moguće u velikim i opterećenim elektroenergetskim sustavima). Današnji udio nuklearnih elektrana u svjetskoj elektroenergetskoj proizvodnji čini oko 16 posto.

I nekonvencionalni oblici energije ne daju se najčešće realno koristiti bez istodobnog angažiranja javne elektroenergetske mreže. Prva geotermalna elektrana je iz 1913., prva elektrana na plimu i oseku iz 1966. godine, vjetrena elektrana velike snage (reda 3 MW) je s početka osamdesetih, a solarna elektrana velike snage (500 kW), uz direktnu pretvorbu energije Sunčeva zračenja u električnu energiju, datira s početka devedesetih godina prošlog stoljeća. Očito, ovdje je značenje atributa *velik* znatno manje prema značenju koje ima taj atribut kod konvencionalnih elektrana.

Distribucija električne energije

Distribucija električne energije, barem u europskim gradovima ali i selima, praktički postaje *nevidljiva* – premda sveprisutna. Vodovi i postrojenja sve više se izvode podzemno, od niskonaponskih do srednjonaponskih; primjena kabela počela je u prvom razdoblju prošlog stoljeća. Ponuda ijedne robe koja se nudi na tržištu razvijenih zemalja nije toliko približena kupcu; u svakom prostoru gdje se kupac može naći, s trenutnom mogućnošću uzimanja.

Distribucija se posljednjih desetljeća, od svjetske energetske krize 1973., naglašenije okreće *upravljanju potražnjom*[18], kako bi se isti društveno-ekonomski učinci postigli uz razumnije korištenje električnom energijom. Od formiranja službi za stručno-energetsko informiranje potrošača, do povoljnog nuđenja zamjenskih ekonomičnijih aparata u najbogatijim zemljama. Teži se smanjiti vršno opterećenje i potražnju energije općenito, ravnomjernije rasporediti potražnju prebacivanjem iz opterećenijih razdoblja u manje opterećena, ali i *punjenjem* razdoblja nedovoljnog iskorištenja kapaciteta novom potražnjom. Uz distribuciju, otvara se novo široko područje tzv. *distribuirane proizvodnje*[19] – riječ je o malim ili manjim proizvodnim jedinicama na obnovljive izvore energije, uz kogeneraciju – tamo gdje dolazi u obzir, disperziranu po srednjo- ili nisko-naponskoj mreži, praktički do dvorišta pojedinih kućanstava.

Elektromotorne i druge primjene u industriji, kućanstvima i ostalim djelatnostima

Početak javne elektrifikacije zatekao je tadašnju industrijsku proizvodnju s korištenjem ponajprije parnim strojem, ali i plinskim motorima, kao izvorima pokretne snage u mnogim proizvodnim procesima. Stoljeće pare zamijenit će nadolazak stoljeća elektrike[20], što se tiče

[18] DSM = Demand Side Management (engl.)

[19] DG = dispersed generation (engl.)

[20] Korištenje parom u 19. stoljeću, najprije parnim strojevima a kasnije parnim turbinama, time i ugljenom kao primarnim izvorom energije, te donekle i neposredno korištenje vodnim snagama za pogon, označilo je industrijsku revoluciju, prelazak čovječanstva na industrijski način proizvodnje materijalnih dobara. Druga industrijska revolucija nastupa koncem pretprošlog stoljeća, upravo primjenom elektrike za pogon strojeva. Nastavak, do današnjih dana, često se uzima podijeljen još na dva doba: nuklearno doba (od početka korisne primjene nuklearne energije) i svemirsko doba (od prvih prodora čovjeka u svemir).

pogonskih strojeva u proizvodnji. Teško bi bilo ostvariti Fordovu montažnu traku iz prvog desetljeća prošlog stoljeća, bez raznovrsne primjene elektromotora. Teslin asinkroni motor izmjenične struje i danas ima najmasovniji udjel u elektromotorima, ali sve složenije regulacijske zahtjeve rješavaju od njega kompleksniji elektromotori, dopunjavani s vremenom elektromehaničkim, poluvodičkim i mikroprocesorskim sklopovima.

Elektromotori, pored primjene u industriji i kućanstvima, osigurali su i pogonsko rješenje kopnenim prometnim sredstvima. Električni vlak i tramvaj u Berlinu pojavljuju se prije početka svjetske javne elektrifikacije. Londonska podzemna željeznica iz 1863. godine prešla je s parnog na električni pogon 1890. godine. Elektrificirana željeznica je osobiti primjer kako se za kopneni transport može koristiti bilo koji primarni oblik energije, jer se svaki primarni 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 i elektrolitičko pročišćavanje metala i galvanizaciju. U proizvodnji čelika i drugih metala, najkvalitetnija taljenja ostvaruju se u indukcijskim pećima od 1899. godine.

U kućanstvima najprije je, pored rasvjete, električna energija primjenjivana za kuhanje, glačanje i pripremu tople 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 više od 90 posto kućanstava koristi električni hladnjak i stroj za pranje rublja.

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 1875. godine. To su počeci globalnih komunikacija, koje će se dolaskom javne elektrifikacije kao distribuiranim izvorom pogonske energije proširiti na žična i bežična rješenja za prijenos poruka, govora i slike. Prvi bežični signali preneseni su na prijelazu u 20. stoljeće (Tesla, Marconi), a prva javna radiopostaja je od 1920. godine. Javno emitiranje televizijskog programa je od 1935. godine, a program u boji je od 1963. godine.

Prvo programabilno ali elektromehaničko računalo je načinio Zuse godine 1941., a 1946. načinjeno je prvo potpuno elektroničko računalo ENIAC[21]. Mikročip je *rođen* 1959., kada je više tranzistora integrirano na jednoj pločici. Krajem 1986. ostvaren je čip od 4 megabita na pločici veličine 0,5 cm^2; omogućuje memoriranje sadržaja dvadesetak novinskih stranica. Prvo osobno računalo je "Apple" iz 1976. godine.

U sekundarnom tehnološkom području, elektroprivreda naglašeno žurno koristi blagodati koje pruža razvoj. Početkom elektrifikacije, rješenja su se oslanjala na primjenu elektromagnetskih uređaja, elektromagnetskih releja ponajprije, uz najprije žičnu a kasnije i bežičnu komunikaciju (u drugoj polovini prošlog stoljeća). Već prije Drugog svjetskog rata ostvaruje se žično daljinsko upravljanje elektroenergetskim objektima. Svojstva električne energije – u svakom trenutku potpuna izjednačenost trenutne (u stanovitoj mjeri ćudljive, možda čak i iznenadne) potražnje i proizvodnje električne energije i to uz sve veću prostornu diverzifikaciju, sada već nacionalnih razmjera – traže primjenu što cjelovitijeg daljinskog nadzora i daljinskog davanja izvršnih naloga i to je razlog velike zainteresiransti elektroprivrede za rezultate razvoja tih u pravilu također elektrotehničkih područja. Od šezdesetih godina prošlog stoljeća rješenja se sve više zasnivaju na primjeni poluvodiča, elektronici.

[21] Electronic Numerical Integrator and Computer

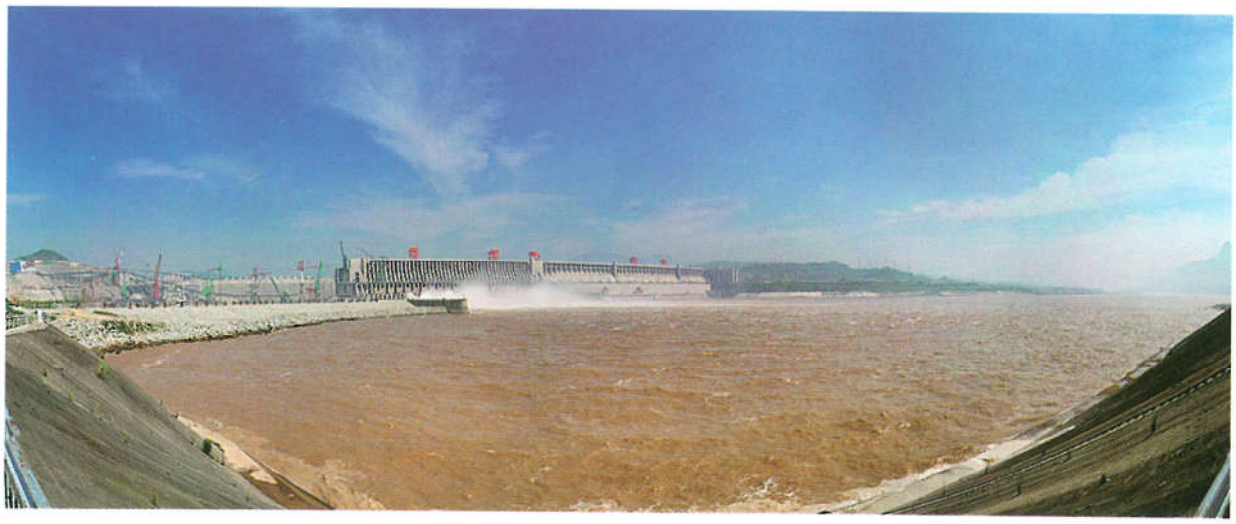
Sredinom šezdesetih, počinje se koristiti računalo za vođenje procesa u termoelektranama, a koncem sedamdesetih uvlače se u elektroenergetska postrojenja prvi svjetlovodi za komunikacijske zadaće. Današnji se gotovo svi uređaji u sekundarnim postrojenjima zasnivaju na mikroprocesorima, a komuniciraju svjetlovodima.

Spomenutim područjima korištenja, dodajmo samo još primjenu elektrike u medicini, jer je iznimnog značenja. Rendgenski aparat je iz 1895., elektrokardiografski uređaj je iz 1903., a elektro-encefalografski iz 1924. godine. Prvi elektronski mikroskop konstruiran je 1931., ultrazvučni dijagnostički aparat 1943., a od šezdesetih godina prošlog stoljeća primjenjuju se laserske zrake za operacijske zahvate.

Električna energija u današnjici

U današnjem svijetu, praktički trećina ukupno utrošene primarne energije koristi se za transformaciju u električnu energiju, da bi udio električnog oblika u finalnoj energiji (dakle kod potrošača energije) bio viši od 16 posto (2003). Karakteristična su kretanja 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 okolinu. To se postiže skupocjenim postrojenjima za odsumporavanje i uklanjanje dušikoksida i smanjenjem udjela elektrana na fosilna goriva (ugljen, naftu i plin) ili povećanjem stupnja njihova djelovanja (kombi-elektrane), što vodi smanjenju emisije ugljikova dioksida, pri istoj proizvodnji električne energije.

Današnja (2003) godišnja potrošnja električne energije prosječnog stanovnika svijeta je oko 2400 kWh, uzmu li se u obzir svi stanovnici svijeta – i oni koji koriste električnu energiju i onih oko 2 milijarde koji se njome uopće ne koriste. Razvijene europske zemlje toliko su električne energije trošile polovinom šezdesetih godina prošlog stoljeća, a danas troše dva do tri puta više. Tijekom čitava prošlog stoljeća ostvaren je u svijetu porast potrošnje ukupne primarne energije po prosječnoj stopi od oko tri posto godišnje. Korištenje električnom energijom raslo je znatno – dvostruko – brže, čak prosječno oko 6,4 posto godišnje (počevši



Slika 3.5. Hidroelektrana Tri kanjona u Kini, 18200 MW

Slika 3.6. Hidroelektrana Itaipu u Brazilu/Paragvaju, 12600 MW

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 posvuda bila otvorena i javna djelatnost stanovito je pridonijela takvom njezinom svjetskom razvoju. U civiliziranim zemljama, javna se dostupnost elektrike naprosto podrazumijeva, poput zraka i vode.

Početkom tisućljeća (2003), u svijetu proizvedeno je ukupno više od 16600 teravatsati (točno 16661 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 biogoriva i otpad)[22].

Elektroenergetski svjetski *giganti*, prema proizvodnji električne energije u 2003. godini, su: SAD (oko 4000 TWh, gotovo četvrtina svjetske proizvodnje), zemlje Europske Unije (oko 3000 TWh), Kina (oko 1900 TWh) i Japan (oko 1000 TWh). U navedenim zemljama proizvede se gotovo 60 posto svjetske proizvodnje električne energije. U njima živi nešto više od jedne trećine svjetskog stanovništva (u SAD 291 milijun, u Europskoj Uniji 454 milijuna, u Kini 1295 milijuna, a u Japanu 128 milijuna, ili ukupno 2168 milijuna, prema 6268 milijuna stanovnika svijeta u 2003. godini, po podacima IEA).

Najveća hidroelektrana na svijetu je "Tri kanjona"[23] na rijeci Jangce u Kini (slika 3.5). Gradnja je počela 1993. godine, da bi elektrana otpočela s proizvodnjom 2003. godine, a kada bude potpuno dovršena – očekuje se 2009. godine, imat će 26 hidroagregata ukupne snage 18200 megavata! To je snaga četiri i pol puta veća od sadašnje snage svih hrvatskih elektrana (približno 4000 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, instalirane snage 12600 megavata i prosječne godišnje proizvodnje 93 TWh (slika 3.6).

---

[22] Key World Energy Statistics 2005, IEA

[23] 三峡 (na kineskom), Three Gorges (engl.)

Slika 3.7. Nuklearna elektrana Fukušima u Japanu, 9100 MW

Najveća nuklearna elektrana na svijetu je Fukušima u Japanu, s deset reaktora, ukupne instalirane električne snage 9096 megavata (slika 3.7). Građena je postupno, između 1971. i 1987. godine, a sadrži – između ostalih agregata – i pet turboagregata od po 1100 MW.

Najveća konvencionalna termoelektrana na svijetu je Kašima u Japanu, ukupne snage 4400 megavata, u tome dvije jedinice od po 1000 MW. Pogonsko gorivo je teško loživo ulje i sirova nafta.

Stoljeće svjetske javne elektrifikacije

Opće otkriće ili događaj	Godina	(Elektro)tehničko otkriće ili događaj
	1882	Prve javne elektrane (New York, London)
		Istosmjerni prijenos Miesbach–München, 57 km
Rođen Ivan Meštrović (umro 1962)	1883	Teslino okretno magn.polje i indukcijski motor
	1884	Transformator na izložbi u Torinu
	1885	Benzov automobil
	1886	Elektrootporno zavarivanje
	1887	Gramofonska ploča. Hertzovi el.magnetski valovi
	1888	Teslin električni prijenos snage višefaznim sustavom
Eiffelov toranj u Parizu	1889	Upotrebljiv indukcijski motor, Dolivo-Dobrovoljski
Londonska elektr.podzemna željeznica	1890	Elektrolučno zavarivanje
	1891	Trofazni prijenos Lauffen–Frankfurt,175 km
	1892	
Rođen Miroslav Krleža (umro 1981)	1893	Fotoćelija. Automobil na električni pogon
Kinematograf braće Lumiere	1894	
Rođen Ivo Tijardović (umro 1976)	1895	Rendgenske zrake. Uljni prekidač. Antena
Atena: obnova Olimpijskih igara	1896	Bequerel: prirodna radioaktivnost
	1897	Dizelski motor. Katodna cijev. Radiotelegrafija
Emile Zola: "Optužujem!"	1898	Prva velika protočna HE
	1899	Indukcijska peć
Let Zeppelinova zrakoplova	1900	Parna turbina u elektrani
Prva Nobelova nagrada: Röntgen, ...	1901	Električni usisavač prašine
Rođen Dobriša Cesarić (umro 1980)	1902	Električni pisaći stroj
Let avionom braće Wright	1903	Elektromotorna kola – svjetski rekord: 212 km/h
	1904	Dioda, prva elektronska cijev
	1905	Metalna nit u žarulji
Uveden SOS kao poziv za pomoć	1906	Telegrafski prijenos slike. Plinska turbina
Picasso: Kupačice iz Avignona	1907	Fordov automobil Model T
	1908	Radiotelegfafski promet preko Atlantika
Mohorovičićev diskont. Peary na sj. polu	1909	Umjetna smola, bakelit
	1910	Neonska žarulja. Nadstrujni relej
Amundsen na južnom polu	1911	Prvi 110 kilovoltni vod
Katastrofa "Titanica"	1912	Kaplanova vodna turbina
	1913	Bohrov model atoma. Geotermalna elektrana
Panamski kanal. Prvi svjetski rat	1914	
	1915	Einstein: opća teorija relativnosti
Balkanexpress: Berlin–Carigrad	1916	Kotao s izgaranjem ugljene prašine
Oktobarska revolucija	1917	Kondenzatorski mikrofon
Okončan Prvi svjetski rat	1918	Rutherford: radioaktivni raspad
Versajski mir	1919	
	1920	Prva javna radiopostaja, 1kW
	1921	Osnovana CIGRÉ

Otkriće Tutankamonove grobnice	1922	Zvučni film. 220 kilovoltni vod
Pariz: prvi cestovni semafor	1923	Distantni relej
Gershwinova Rapsodija u plavom	1924	Elektrodinamski zvučnik. Elektroencefalograf
Eisensteinova Krstarica Potemkin	1925	Osnovan UNIPEDE[24]
	1926	Paralelni pogon njemačke i švicarske mreže
Lindbergov prelijet Atlantskog oceana	1927	Pneumatski prekidač
Flemingovo otkriće penicilina	1928	Teleprinter. Geiger-Müllerov brojač
Svjetska ekonomska kriza	1929	Prva velika pumpno-akumulacijska HE
Ghandijev marš soli	1930	Bežični prijenos slike, preteča TV-a
New York: Empire State Building	1931	Elektronski mikroskop
Visinski rekord A.Piccarda:16370m	1932	Automobilski radioaparat
Rooseveltov New Deal	1933	Prva teleprinterska mreža
	1934	Umjetna radioaktivnost
	1935	Radar. Magnetofon. Prva javna TV
Le Corbusierova Brazilija	1936	Prijenos pri naponu 287 kV
Tragedija zepelina "Hindenburg"	1937	Generator hlađen vodikom. Volkswagenova "buba"
Anschluss Austrije	1938	Fisija uranove jezgre. Magnetofon
Početak Drugog svjetskog rata	1939	
	1940	Toplinska pumpa
Ulazak SAD-a u rat	1941	Prvo programabilno računalo s relejima, Zuse
	1942	Fermijev nuklearni reaktor
Kapitulacija fašističke Italije	1943	Ultrazvučni dijagnostički aparat
Savezničko iskrcavanje u Normandiji	1944	
Kapitulacija Njemačkog Reicha	1945	
Organizacija ujedinjenih naroda	1946	Veliko elektroničko računalo ENIAC
"Kon-Tiki" preko Atlantika	1947	Tranzistor
Blokada Zapadnog Berlina	1948	
Dvije Njemačke	1949	Radioteleskop
	1950	Mrežno tonfrekventno upravljanje
Osnutak Eur.zajednice za ugljen i čelik	1951	Osnovana UCPTE
Hemingway: Starac i more	1952	Prijenos pri naponu 380 kV
Hilary i Tensing na Mt Everestu	1953	Daljinski upravljana trafostanica
	1954	Silicijska solarna ćelija
	1955	Gorivna ćelija
Sovjetska intervencija u Mađarskoj	1956	Komercijalna nuklearna elektrana. Tiristor
Osnutak EEZ[25]: 6 članica. Sputnjik	1957	Prijenos pri naponu 500 kV
	1958	Paralelni pogon Francuske, Njemačke i Švicarske

[24] UNIPEDE, International Union of Producers and Distributors of Electrical Energy, Međunarodna unija proizvođača i distributera električne energije. 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 Bruxellesu. Punopravne članice su elektroprivrede iz zemalja članica EU-a te iz zemalja kandidata za članstvo u EU-u (pa 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).

[25] Europska ekonomska zajednica, osnivači: Francuska, Italija, Belgija, Nizozemska, Luksemburg i Njemačka; preteča Europske unije.

	1959	Integrirani krug; mikročip
Pojava Beatlesa	1960	Otkriće laserskih zraka. SF_6-prekidač
Berlinski zid. Gagarin u Zemljinoj orbiti	1961	
Kubanska kriza: SAD-SSSR	1962	Telstar – omogućenje svjetske TV
Ubijen J.F.Kennedy	1963	Kazetofon. Televizija u boji
Slika druge Mjesečeve strane	1964	Prvo procesno računalo u TE
	1965	Prijenos pri naponu 735 kV
"Kulturna revolucija" Mao Ce Tunga	1966	Elektrana na plimu i oseku. Vakuumski prekidač
Prva transplatacija srca	1967	Floppy-disk za računala
Sovjetska intervencija u ČSSR-u	1968	Slojni, difuzni tranzistor (MOS)
Aldrin i Armstrong na Mjesecu	1969	Tranzistor s efektom polja (FET)
Sporaz.o zabrani uporabe atom.oružja	1970	Mikroprocesor Intel
Hrvatsko proljeće	1971	Asuanska brana, 2100 MW
Teroristički masakr na Olimpijadi u Münchenu	1972	
	1973	Svjetski naftni šok
Afera Watergate, pad Nixona	1974	
Helsinška konferencija o eur. sigurnosti i suradnji	1975	
	1976	Turbogenerator 1600 MVA. Prvo osobno računalo "Apple"
	1977	Transformator za ultravisoki napon
Rođena prva beba iz epruvete	1978	Primjena svjetlovoda u elektroprivredi. Prva komercijalna mobitelna mreža u Chicagu
	1979	Nezgoda u NE "Otok tri milje[26]". Prvi CD
	1980	Prijenos videoteksta
Ubijen Anvar el Sadat	1981	Vlak Pariz–Lyon: 380 km/h
	1982	Najveća HE na svijetu: Itaipu
	1983	Vjetrena elektrana reda 3 MW
	1984	
Gorbačovljeva Perestrojka	1985	Prijenos pri naponu 1150 kV
Ubijen Olof Palme	1986	Havarija NE "Černobilj". 4-megabitni čip, 0,5 cm^2. Organizacija Interneta
	1987	
Podmorski tunel Hokaido–Honšu	1988	Vlak s linearnim motorom: 413 km/h
Rušenje Berlinskog zida	1989	
Ujedinjenje dvije Njemačke	1990	
Domovinski rat. Raspad SSSR	1991	Puna snaga HE Itaipu: 12,6 GW
Međunar.priznanje Republike Hrvatske	1992	Direktna solarna elektrana 500 kW
Sporazum iz Maastrichta: Europska Unija	1993	Otpočela proizvodnja početne etape HE "Tri kanjona"
Tunel ispod La Mancha	1994	U pogonu BALTIC-kabel, 250 km
Europska Unija: 15 članica	1995	64-megabitni čip
	1996	Direktiva EU 96/92 o električnoj energiji

[26] Three Mile Island Nuclear Generating Station

4

Svojstva električne energije

Električna energija[27], oblik energije nastao pretvorbom primarnih oblika energije, dolazi na svjetsku pozornicu početkom osamdesetih godina pretprošlog stoljeća kada se ostvaruju prve javne elektrane. Za naše daljnje razmatranje, električna energija je najzanimljiviji oblik energije a doista je nije lako pojmiti. Da je i elektrika uopće energetski oblik rasuđujemo po iskustvu da se može preobraziti (posredno ili neposredno) iz svih primarnih oblika energije, te da se može preobraziti u sve korisne oblike energije.

Električnim zbivanjima uspostavljaju se električna i magnetska polja, naročita energetski uzbuđena stanja prostora (s materijom ili bez materije). U tim se prostorima javljaju sile čijim se radom može koristiti, te se električna energija preobražava u mehaničku. Može se također povećati unutarnja toplinska energija materije, te iskoristiti kao toplina i svjetlo. Konačno, može se jedna tvar kemijski preobraziti u drugu i time električna energija pretvoriti u kemijsku.

Poželjna svojstva električne energije

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

– pojedini se konvencionalni primarni oblici energije ne daju masovno ni koristiti bez prethodne transformacije u električnu energiju (nuklearno gorivo, niskokalorični ugljen, vodne snage);

– većina nekonvencionalnih oblika energije mora se koristiti u svom prirodnom dotoku (vjetar, Sunčevo zračenje, mali vodotoci), pa je prikladna njihova prethodna pretvorba u električni oblik i plasman u elektroenergetski sustav odakle se – kombinirajući se s regulabilnom proizvodnjom konvencionalnih izvora – preuzima sukladno potrebama;

– jednostavan prijenos velikih količina energije na veoma velike udaljenosti uz ne pretjerane gubitke pri tome, prijenosna mreža tvori transportni put za prijenos energije unutarkontinentalnih razmjera; zamjenjuje ili rasterećuje univerzalno ceste, pruge i cjevovode;

– vrlo jednostavne i jeftine instalacije za razvođenje električne energije do svakog trošila (usporedimo to primjerice s krutim ili tekućim gorivima), te jednostavno rukovanje tim trošilima i njihovo održavanje;

– vrlo jednostavni, u pravilu masovno proizvedeni i stoga jeftini uređaji za pretvorbu električne u korisni oblik energije: žarulja, otporna peć, asinkroni elektromotor (usporedimo njegovu jednostavnost sa složenošću npr. automobilskog motora), elektrolitska kada;

– stavljanje pojedinog trošila u pogon bez priprema, bez najava, praktički trenutno, na bilo kojem mjestu gdje dopire električna mreža;

– neka, a osobito najsuvremenija korištenja energijom – čiji je razvoj u zamahu, ne daju se danas prihvatljivo ostvariti bez primjene električnog oblika energije (telekomunikacije, računala, vođenje procesa, automatizacija i robotizacija, medicinska pomagala);

– u pravilu: veoma visok stupanj djelovanja pri transformaciji u koristan oblik (tako je, primjerice, tramvaj ekonomičniji u gradskom prijevozu od autobusa);

[27] electrical energy, electricity (engl.), elektrische Energie (njem.)

– neznatno ili praktički nikakvo zagađenje okoliša na mjestu pretvorbe u korisni oblik energije (svjetlo, mehanički rad, toplina, elektrolitički učinak);

– oko četvrtina ukupne korisne energije utroši se u prometu; primjena električne energije za željezničku vuču omogućuje korištenje svim primarnim oblicima energije za taj promet;

– elektroprivreda je u civiliziranom svijetu ustrojena kao javna djelatnost, države osiguravaju uvjete za kvalitetnu, sigurnu i ekonomičnu opskrbu električnom energijom.

Ograničenja

Glavna svojstva koja ipak donekle ograničavaju korištenje električnom energijom su:

– nemogućnost uskladištenja energije u električnom obliku i time znatno veći proizvodni, prijenosni i distribucijski kapaciteti od prosječno potrebnih (moraju biti dimenzionirani za kratkotrajna vršna opterećenja, a izvan tog vremena su podopterećeni);

– fizikalno neizbježno: veliki gubici pri pretvorbi mnogih primarnih oblika u električni oblik;

– u pravilu: veliko opterećenje okoline (emisijom štetnih tvari i topline) na mjestima proizvodnje električne energije, složene i skupe mjere sniženja tog opterećenja na prihvatljivu razinu;

– elektroenergetski sustavi, danas povezani na kontinentalnim prostranstvima, predstavljaju skupocjene materijalne strukture golemih 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 okolinu, funkcioniranja i održavanja;

– na mnogim lokacijama prihvatljivim za izgradnju termoelektrana nije moguća kogeneracija (istodobna isporuka topline uz električnu energiju), jer nema potrošača topline u razumnoj blizini, pa se otpadna toplina objektivno ne može iskoristiti;

– električna mreža mora doprijeti gotovo do svakog mjesta civiliziranog čovjekova življenja, proizvodnje i svakog drugog djelovanja – što ponekad nije ekonomično;

– trajna je potreba revitalizacije svih jedinica koje čine elektroenergetski sustav, jer je njihova životna dob objektivno ograničena a potreba za funkcioniranjem neprestana, kao i potreba uvođenja rješenja koja povećavaju stupanj djelovanja i smanjuju opterećenje okoline;

– zbog trajnog porasta potražnje električne energije, elektroenergetski sustav se neprekidno mora dograđivati. To može dovesti do najmanje dvije bitne neočekivanosti: nužnost posezanja i za neekonomičnijim rješenjima (jer su ekonomičnija već iskorištena) i izražene mogućnosti 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 rastu postupno):

– zbog svega toga – objektivno veoma visoka cijena električne energije u odnosu na cijenu ostalih oblika energije, osobito onih koji se i u primarnom obliku mogu koristiti neposredno (prirodni plin, ogrjevno drvo ili rovni ugljen);

– neracionalna je pretvorba električne energije u toplinu (osim iznimno), a toplinske potrebe čovječanstva iznose preko 50 posto finalne energije;

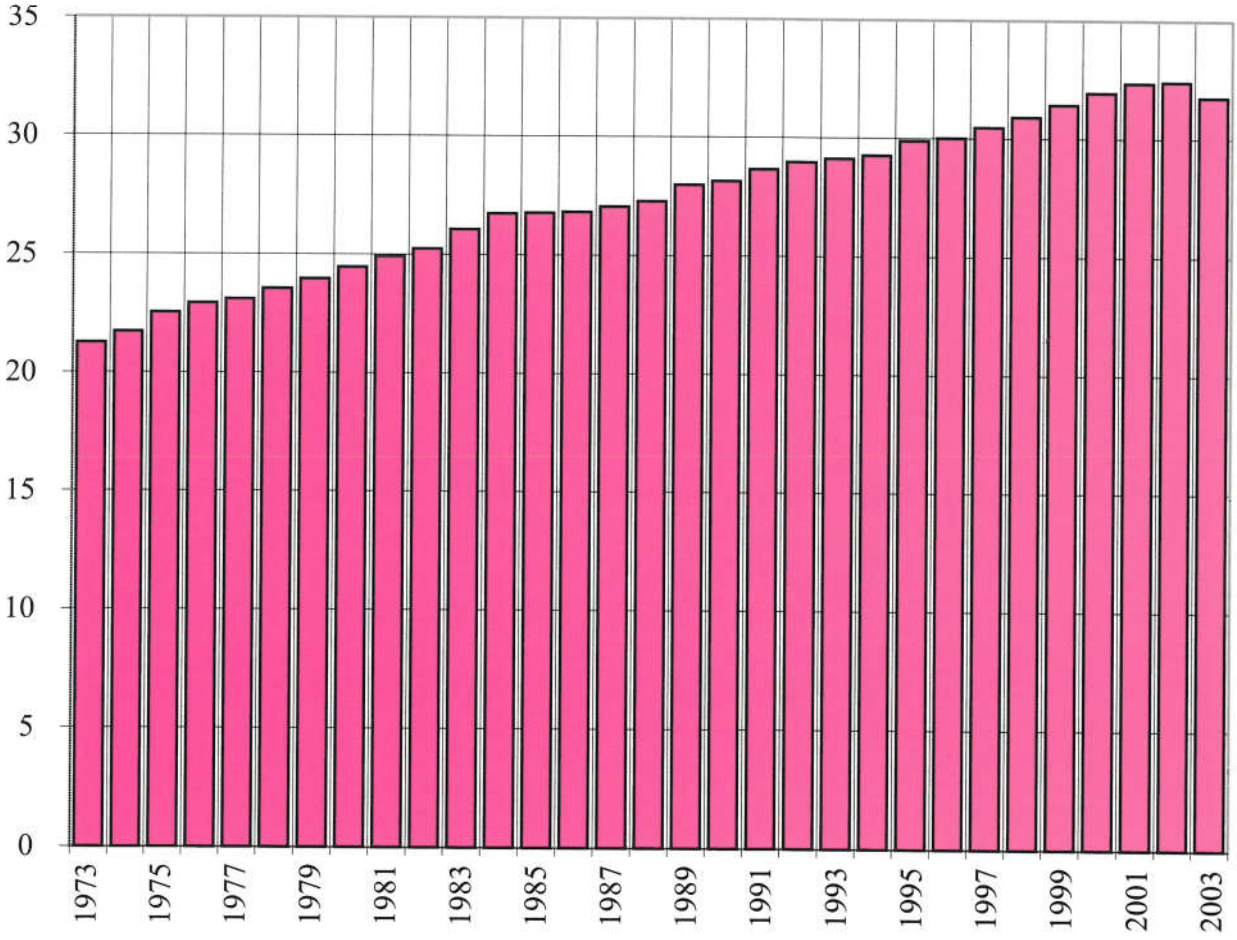
– nije moguća opskrba vodnog i zračnog prometa električnom energijom iz elektroenergetskog sustava. Za sada još nije riješena bar donekle masovnija opskrba cestovnog prometa električnom energijom, a promet troši oko 25 posto finalne energije.

Najbitnije: jednakost proizvodnje i potrošnje

Istaknimo još jednom najvažnije i neraskidivo svojstvo električne energije: istodobnost proizvodnje i potrošnje – nemogućnost njezina uskladištenja. U svakom trenutku mora ukupna proizvodnja biti jednaka ukupnoj potrošnji; to svojstvo ne sadrži ijedna druga roba na tržištu! Praktično sva druga roba se proizvodi, uskladištuje i onda koristi sukladno potražnji. A električna energija mora se proizvoditi u ritmu (u stanovitoj mjeri: otežano predvidljivom) potražnje. Potražnja električne energije ima vrlo naglašene oscilacije: po satima u jednom danu, po danima u jednom tjednu, po sezonama u jednoj godini. Cjelokupni elektroenergetski sustav mora biti dimenzioniran tako da omogući opskrbu i pri najvećoj istodobnoj potražnji, da bi u svim drugim prilikama bio zapravo podopterećen.

Još jedna osobitost električne energije: osim neznatno – u medicinske svrhe (elektroterapija) – ne koristi se izravno ni na koji drugi način, nego tek pretvorbom u koristan oblik (svjetlo, toplinu, mehanički rad i kemijski oblik).

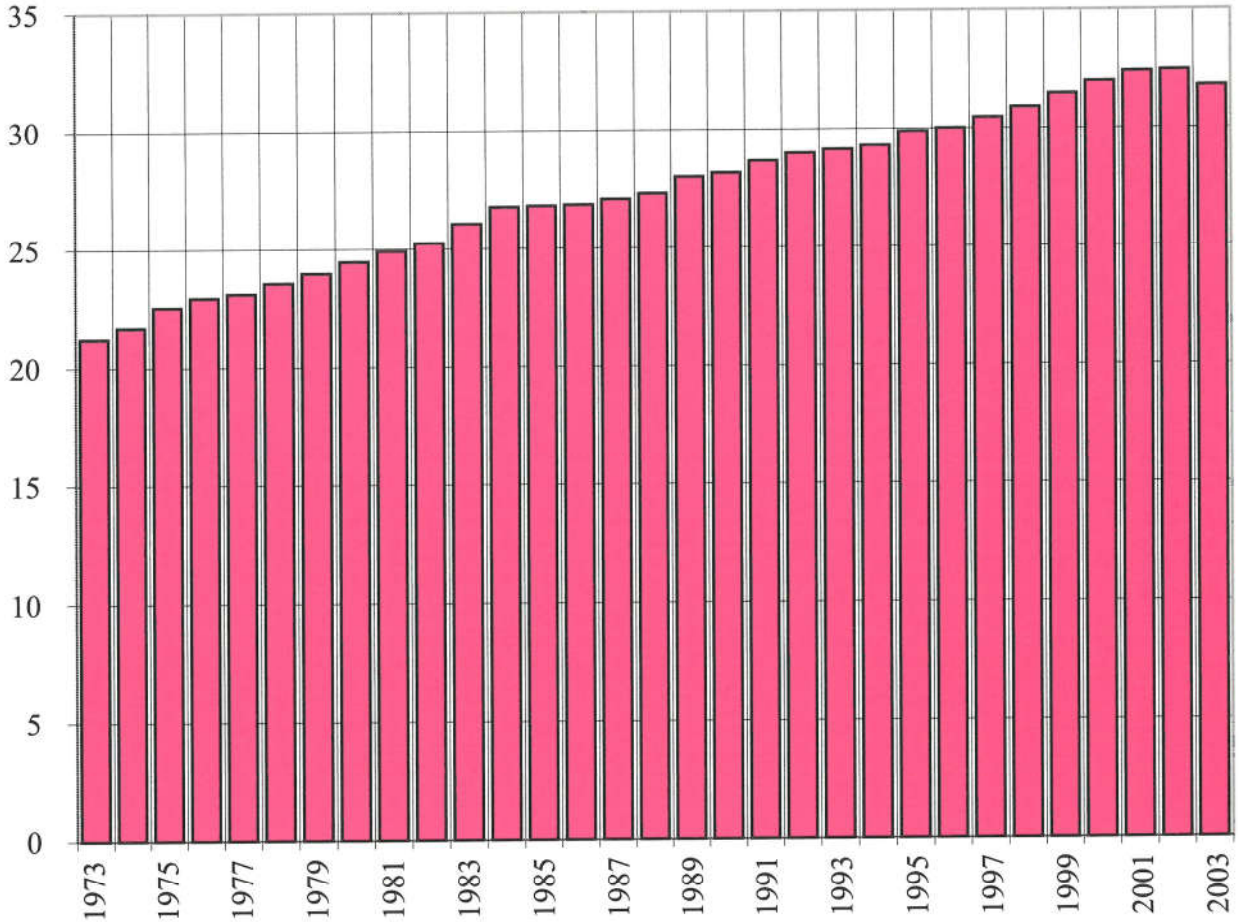
Niti u posljednjih tridesetak godina, nakon svjetskih energetskih udara, razvoj korištenja električnom energijom nije zastao. Time je udio energije za proizvodnju električne



Izvor: IEA-Key World Statistics 2005

Slika 4.1. Udio energije za proizvodnju električne energije u ukupnoj potrošnji primarne energije u svijetu (%)

energije u ukupnoj primarnoj potrošnji energije u svijetu porastao s 21 posto u 1973. godini na oko 32 posto u 2003. godini. Dakle svaki treći džul koji se ukupno utroši u svijetu, najprije se preoblikuje u električni oblik pa tek onda u korisni oblik energije (slika 4.1). U istom razdoblju, udio se električnog oblika u finalnim oblicima energije povećao s 9,5 posto (1973) na nešto više od 16 posto (2003) (slika 4.2). Automatizacija, kompjuterizacija, pa i robotizacija, određuju takav smjer kretanja i u predstojećoj budućnosti. Električna energija postala je nezaobilazna osnova materijalnih i društvenih djelatnosti i osobnog života čovjeka.



Izvor: IEA-Key World Statistics 2005

Slika 4.2. Udio eletkrične energije u finalnoj potrošnji energije u svijetu (%)

Prekid opskrbe električnom energijom, ako je širih prostornih razmjera i dugotrajniji, izaziva znatnu 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 – praktički – u svakoj materijalnoj proizvodnji...).

Veličina energije od 1 kilovatsata

Na kraju, iznesimo nekoliko primjera korištenja energijom od 1 kilovatsata, iz svakodnevnice (slika 4.3). Nije impresivno – očekivali smo tako!? Međutim, ako ljudskim mehaničkim radom iskažemo veličinu od 1 kilovasata, dolazimo do impresivnijeg saznanja (slika 4.4). Teško da bi uopće bila svladiva zadaća prenošenja takvih vreća od 36 kilograma iz prizemlja na treći kat, ako bi nam više odgovarala vreća od 18 kilograma trebali bismo to učiniti dvije tisuće puta – kako bismo obavili rad od 1 kilovatsata.

Što s 1 kilovatsatom?

- Ispeglati 15 košulja
- Skuhati 70 šalica kave
- Gledati televiziju 7 sati
- Skuhati ručak za četiri osobe
- Oprati rublja za jedan stroj
- Žarulja od 100 vata – 10 sati
- Štedna žarulja od 20 W – 50 sati
- U 80-litarskom bojleru zagrijati vodu za 11°C

Slika 4.3. Što s 1 kilovatsatom?

Koliki je 1 kilovatsat?

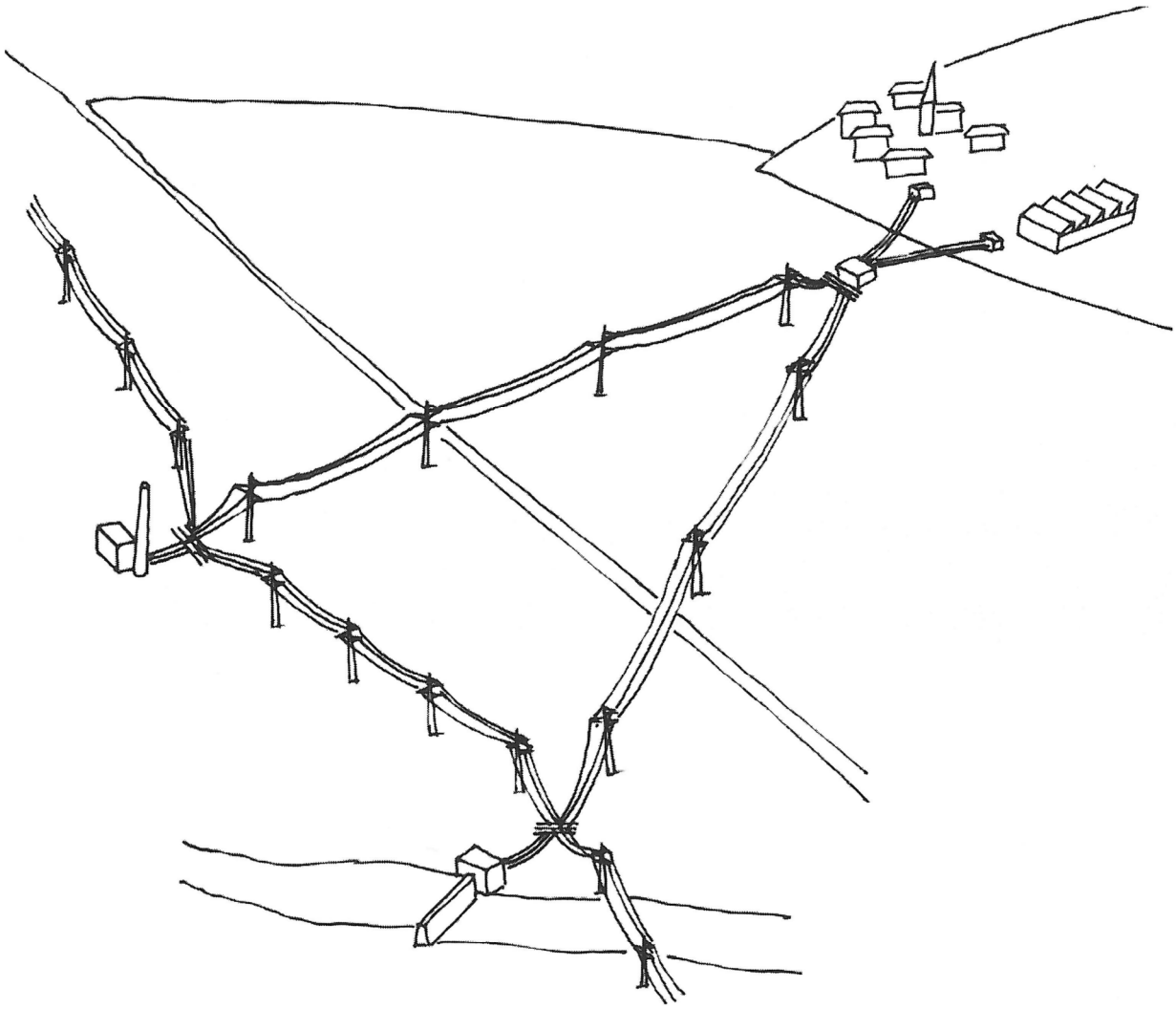
- Najbolja predodžba – ljudski mehanički rad
- Primjer: Vreće od 36 kilograma prenositi na visinu od 10 metara, iz prizemlja na treći kat
- Tisuću vreća morali bismo prenijeti da bismo obavili rad od 1 kilovatsata!

Slika 4.4. Koliki je 1 kilovatsat?

5

Prijenos električne energije

Elektroprivreda[28] je gospodarska energetska grana u kojoj se proizvodi, prenosi i distribuira električna energija radi prodaje njezinim kupcima. *Proizvodnja*[29] električne energije zapravo je pretvorba drugih oblika energije (ugljena, derivata nafte, plina, nuklearnog goriva, vodnih snaga i nekonvencionalnih oblika energije) u električni oblik, a odvija se u *elektranama*[30].



Slika 5.1. Prijenosna mreža povezuje termoelektrane i hidroelektrane s glavnim čvorištima potrošnje električne energije, odakle se opskrbljuju kućanstva i industrija

[28] electric power industry, power industry, electricity industry (engl.), Elektrizitätswirtschaft (njem.)
[29] production, generating (engl.), Erzeugung (njem.)
[30] power station (engl. UK), power plant (engl. SAD), Kraftwerk (njem.)

Prijenos električne energije[31] je elektroprivredna djelatnost koja (a) omogućuje svakog trenutka kombiniranje proizvodnje električne energije između pojedinih trenutačno angaziranih elektrana, na vlastitom području ili iz uvoza, te (b) omogućuje dobavu velikih količina električne energije u glavna čvorišta mreže u skladu s trenutačnom potražnjom tih čvorišta, odakle se energija neposredno predaje vrlo velikim kupcima, dalje prenosi radi izvoza ili raspodjeljuje djelatnošću *distribucije električne energije*[32] do pojedinačnih kupaca.

Objekti za prijenos električne energije čine *električnu prijenosnu mrežu*[33]: to su transformatorske stanice, rasklopna postrojenja te nadzemni i kabelski vodovi visokog napona (slika 5.1). Prijenosna mreža prekriva cjelokupna područja civiliziranog čovjekova života. Prijenosnom mrežom osigurava se usklađena uloga elektrana, tek kooperativnim njihovim radom posredovanjem prijenosne električne mreže može nastati konačni proizvod – električna energija, svojstvene cijene, sigurnosti opskrbe i kvalitete.

Električne distribucijske mreže[34], priključene na čvorišta prijenosne mreže, protežu se po manjim predjelima, gradovima, naseljima, ulicama – do objekata za stanovanje, gospodarskih, društvenih i općih objekata, omogućujući isporuku električne energije radi njezina korištenja.

Korištenje električnom energijom, potrošnja – kako uobičajeno govorimo, pretvorba je električne energije u korisni oblik energije: svjetlo, mehanički rad, toplinu i kemijsku energiju.

Današnja civilizacija bitno je povezana s *elektrikom.* Preko 50 posto svih finalnih energetskih potreba je toplina (koju je nerazumno ostvarivati pretvorbom iz *električne energije,* osim iznimno) a oko 25 posto su potrebe prometa (koje pretežno nije moguće namiriti *električnom energijom,* osim za željeznicu). Izlazi da se sve preostale ljudske djelatnosti (osobito one najkvalitetnije) energetski oslanjaju praktički isključivo na *električnu energiju.* Stoga je elektroprivreda, i u njoj prijenos električne energije, od osobitog značenja za današnji pogon *Zemaljskog kotla* u kojem živimo.

Djelatnost prijenosa električne energije obuhvaća razvoj, izgradnju, pogon i održavanje prijenosne mreže. Prema recentnom gledanju na prijenosnu mrežu, kao svojevrsnu *pozornicu* na kojoj se zbivaju složeni tehničko-tehnološki i komercijalno-pravni procesi, uz djelatnost prijenosa električne energije veže se i vođenje elektroenergetskog sustava, unutar nekog poznatog zemljopisnog područja, dakle vođenje cjelokupnog procesa od osiguranja potrebne proizvodnje do namirenja tražene potrošnje električne energije i održavanja nužne ravnoteže te proizvodnje i te potrošnje u svakom trenutku.

U prošlom i predvidivom budućem razdoblju, javnoj je elektroprivredi svojstven stalan rast. U tome je prijenos električne energije ostvarivao i ostvarivat će čak brži rast, pa je pravodobno osiguranje razvoja i dogradnje prijenosne mreže novim objektima aktivnost nedjeljiva od pogona i održavanja postojeće prijenosne mreže.

Proizvodnja električne energije u svakom trenutku mora biti izjednačena s potražnjom uvećanom za neizbježne gubitke u mreži, što pred cjelokupnim sustavom za proizvodnju, prijenos, distribuciju i potrošnju električne energije tvori složenu regulacijsku zadaću, koju taj sustav mora svakoga trenutka osigurati – inače bi se *urušio* (slika 5.2). Stvar se dopunski usložnjava time što je potražnja električne energije u svakom trenutku drukčija, podložna svakako stanovitoj statističkoj zakonitosti, ali – barem djelomice – i volji, čak hiru potrošača.

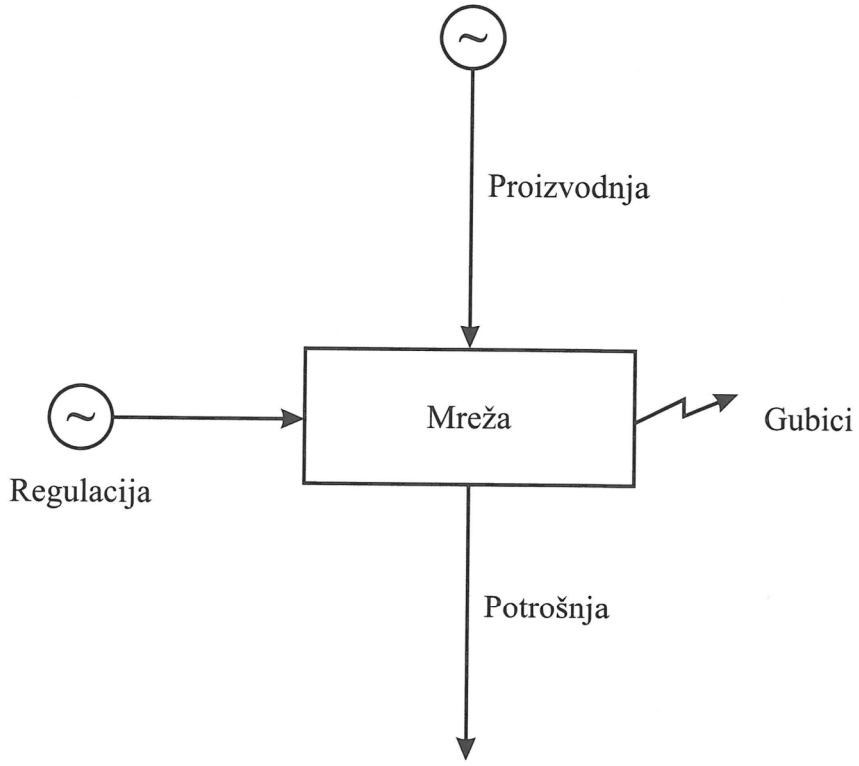
---

31 power transmission (engl.), Stromübertragung (njem.)

32 distribution (engl.), Verteilung (njem.)

33 transmission system, transmission grid (engl.), Übetragungsnetz (njem.)

34 distribution system, distribution grid (engl.), Verteilungsnetz (njem.)

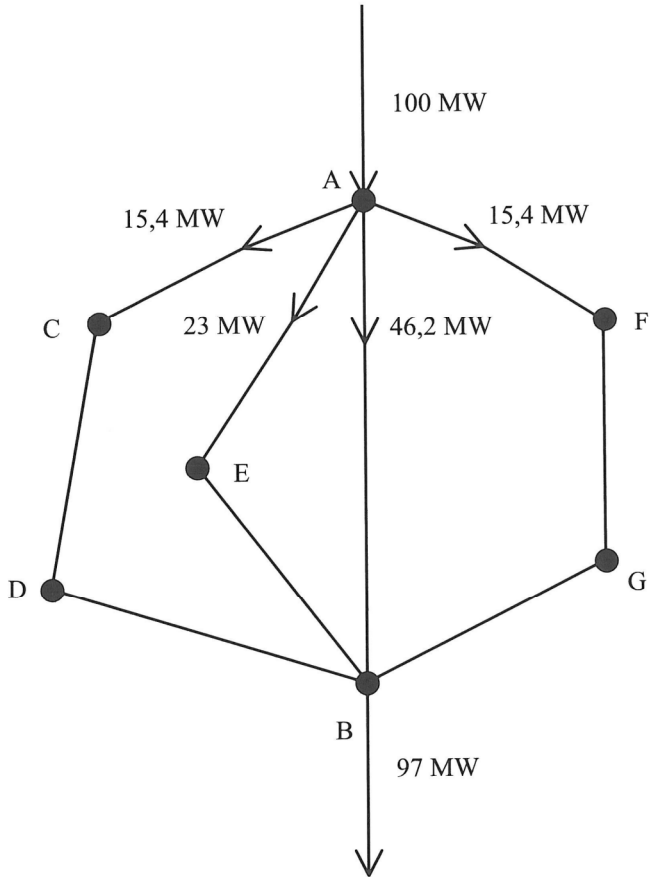


Slika 5.2. Jednakost proizvodnje i potrošnje u svakom trenutku osigurava regulacija (Proizvodnja ± Regulacija = Potrošnja + Gubici)

Najlakše to shvaćamo ako u prostoriji gdje ovaj tren boravimo uključimo ili isključimo rasvjetu. Za snagu te – bez ikakva nagovještaja – uključene ili isključene žarulje, morala se promjeniti angažirana snaga neke regulacijske elektrane, kako bi se i dalje očuvala ravnoteža proizvodnje i potrošnje električne energije. Istodobno, promjena nastupa i u opterećenju grana mreže koje povezuju elektrane s našim potrošačkim čvorištem. A to svakog trenutka mogu učiniti, i donekle čine, milijuni drugih kupaca priključenih na mrežu!

Prijenos se električne energije u uzamčenoj električnoj mreži, dakle mreži koja sadrži *zamke ili petlje*[35], ne može usmjeriti tako da se odvija najkraćim ili bilo kakvim drugim a eventualno poželjnim putem. Prijenos se prirodno ravna po svojstvenim Kirchhoffovim zakonima koji se nikako ne mogu izbjeći. Osim iznimno doista posebnim mjerama koje se svode na ugradnju posebnih uređaja kakvih redovito nema u mreži, ali i tada se prijenos ravna po istim zakonima, samo ne tako evidentno iskazljivim. Dakle, ako se prijenos od primjerice 100 MW želi ostvariti između čvorišta A i B, koji su međusobno povezani izravnim vodom A–B, ali i neizravno putem nekih drugih vodova, primjerice i vodovima A–C–D–B, A–E–B i A–F–G–B, neće se sav prijenos ostvariti samo vodom A–B, nego djelomice i svim drugim spomenutim vodovima (slika 5.3). Primjer koji se slikom ilustrira, načinjen je uz pretpostavke: svi vodovi između dva susjedna čvorišta imaju jednake impedancije (prividne otpore), nema predaje ili preuzimanja snage u usputnim čvorištima a gubici snage koji umanjuju ukupnu snagu dospjelu na kraj tog prijenosa, u čvorište B, iznose recimo tri posto.

[35] Zamke ili petlje, poput *oka* na ribarskoj mreži, samo ne obvezno tako da tvore četverokute, nego bilo kakve višekute: trokute, četverokute, peterokute... Razlika uzamčene mreže prema mreži u radijalnom pogonu je ta što radijalna mreža sadrži sve svoje grane priključene poput grana stabla.



Slika 5.3. Tokovi snage u mreži uz ulaz 100 MW *u čvorište A*
(Pretpostavke: impedancije između svih susjednih čvorišta jednake, nema predaje i preuzimanja snage u čvorištima C, D, E, F i G; ukupni gubici 3 %*)*

Uz takve pretpostavke proizlazi da se na početku izravnog voda A–B uspostavlja tok snage manji od polovine ulazne snage u čvorište A, a više od polovine te snage *razlijeva* se po pokrajnjim vodovima mreže. Izostave li se pretpostavke jer one nisu realne, zaključujemo da su tokovi snaga u prijenosnoj mreži svakog trenutka daleko od onih koje bismo eventualno neutemeljeno priželjkivali. 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 drukčijoj želji.

Na ovome mjestu nužno je dodati i to da se pored djelatne energije[36] u elektroenergetskom sustavu proizvodi, prenosi i distribuira neizbježno i jalova energija[37]. Stoga priču o

[36] Djelatna energija je onaj dio električne energije koji se na mjestu potrošnje pretvara u koristan oblik: svjetlo, toplinu, mehanički ili kemijski oblik, napuštajući nepovratno elektroenergetski sustav. Iskazuje se kilovatsatima (kWh) ili drugim višekratnicima vatsata (Wh): teravatsatima, gigavatsatima, megavatsatima.

[37] Jalova energija je onaj dio električne energije 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 energija *njiše se* između mjesta njezine potrošnje i mjesta njezine proizvodnje, ne napuštajući pri tome elektroenergetski sustav. Iskazuje se kilovarsatima (kvarh) ili drugim višekratnicima varsata (varh).

jednakosti proizvodnje i potrošnje djelatne električne energije treba dopuniti također nužnom jednakošću proizvodnje i potrošnje jalove energije u svakom trenutku. Stvar se dopunski usložnjava time što vodovi prijenosne mreže mogu biti kako potrošači tako i proizvođači jalove energije, ovisno o stupnju svoga djelatnog opterećenja.

Tokove *djelatne snage*[38] pojedinim prijenosnim vodovima također valja smatrati dopunjenim tokovima *jalove snage*[39], promatra li se cjelovita slika, pri čemu je rezultantni tok jednak drugom korijenu iz zbroja kvadrata djelatnog i jalovog opterećenja. Taj se rezultirajući tok naziva *prividna snaga*[40] i on je mjera ukupnog opterećenja vodova i ostalih jedinica sustava.

Koristili smo se pojmovima električne *energije*[41] i *snage*[42]; najbolje da i njih ovdje jasno odredimo. Energija je rad obavljen tijekom stanovitog razdoblja, trajanja. Iskazuje se kilovatsatima ili kakvom višekratniku kilovatsata (megavatsat, gigavatsat, teravatsat). Snaga jest brzina obavljanja rada u jedinici vremena, dakle mjera za to koliko se rada obavi u npr. jednome satu. Mjeri se kilovatima ili opet u višekratnicima kilovata (megavatima, gigavatima, moguće i vatima, tisuću puta manjoj jedinici od kilovata). Primjerice: jednaki rad obavi se snagom od 100 kilovata tijekom 10 sati (1000 kilovatsati) kao i rad snagom od 100 vata tijekom 10 tisuća sati. Tisuću puta većom snagom obavi se isti rad u tisuću puta kraćem trajanju.

Promatramo li električnu mrežu u nekom trenutku, opterećenja *jedinica mreže*[43] iskazujemo snagama, a ako promatramo mrežu u nekom razdoblju, npr. trajanju jedne godine, tada vrijednosne iskaze izričemo energijama koje su proizvedene elektranama ili prenesene vodovima ili potrošene u nekim čvorištima mreže u tom razdoblju.

---

[38] active power (engl.), Wirkleistung (njem.), iskazuje se megavatima (MW) ili drugim višekratanicima vata (W). Uobičajeni znak je P.

[39] reactive power (engl.), Blindleistung (mjem.), iskazuje se megavarima (Mvar) ili drugim višekratnicima od var (kraticom, također: var). Uobičajeni znak je Q.

[40] apparent power (engl.), Scheinleistung (njem.), iskazuje se megavoltamperima (MVA) ili drugim višektranicima voltampera (VA). Uobičajeni znak je S, tako da je $S = \sqrt{(P^2 + Q^2)}$

[41] energy (engl.), Energie (njem.)

[42] power (engl.), Leistung (njem.)

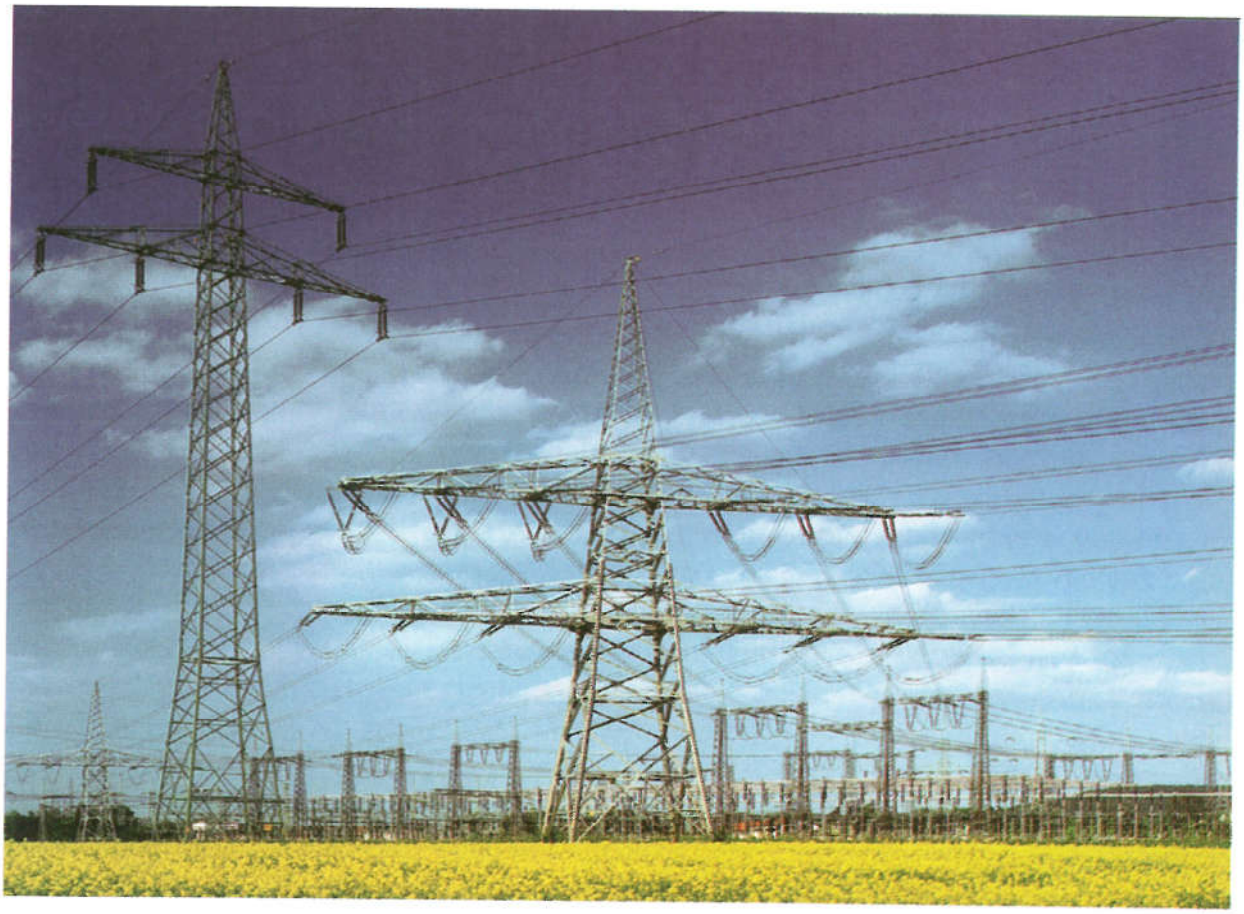
[43] U cijeloj ovoj knjizi dosljedno se govori da prijenosnu mrežu sačinjavaju *jedinice mreže,* to su *network item* (engl.) ili *Netzeinheit* (njem.). Jedinice se sastoje od komponenata. Komponente se sastoje od elemenata. Osnovne jedinice mreže su: vodovi, transformatori i rasklopna postrojenja. Komponente, primjerice, vodova su: fazni vodiči i zaštitno uže, izolatori, spojna, nosiva i zaštitna oprema te stupovi i uzemljenje.

6

Prijenosna mreža i okolina

Prijenosna mreža čini nepretjeran, ali ipak nezanemariv utjecaj na *okolinu*[44]. Dalekovodi najvišeg napona velikih su dimenzija, protežu se velikim prostranstvima, a zgušnjavaju ondje gdje je zgusnuta materijalna poizvodnja i svekolika aktivnost ljudi. Stoga, u najmanju ruku, zauzimaju prostor, ometajući ili onemogućujući kakvo drugo njegovo svrhovito iskorištenje (za podizanje drugih objekata, za poljoprivredno-šumarsku proizvodnju, za promet – osobito zračni) ili barem estetsko-vizualno ometajući prirodni ambijent. Najveće transformatorske stanice vrlo visokog napona zauzimaju ploštinu veću od deset hektara (slike 6.1 i 6.2).

U Republici Hrvatskoj je danas (2004) u iskorištavanju više od sedam tisuća kilometara dalekovoda napona 110, 220 i 400 kV, prije petnaest godina bilo je takvih dalekovoda oko šest tisuća kilometara. Dakle, prosječno, danas se na svakom četvornom kilometru tla Hrvatske nalazi i oko 125 metara visokonaponskih dalekovoda. U Njemačkoj je u pogonu oko 115 tisuća kilometara visokonaponskih vodova, dakle Zemljina kugla mogla bi se obujmiti gotovo tri puta samo njemačkim visokonaponskim vodovima!



Slika 6.1. Zauzimanje prostora objektima prijenosne mreže u Njemačkoj

[44] environment (engl.), Umwelt (njem.)

Slika 6.2. Dalekovodi u blizini Rotterdama u Nizozemskoj

Djelovanje objekata prijenosne mreže na okolinu

Normalni dalekovodni stup već predstavlja skupocjenu konstrukciju (dolazi ih prosječno tri na kilometar duljine) a kamoli ako ga se želi podići toliko da vodiči nadvise drveće, ako dalekovod prolazi šumskim područjem. Potrebne visine stupova barem se udvostručuju. Takve *tornjeve*, nedovoljno bogate zemlje naprosto si ne mogu priuštiti. Neizbježne šumske prosjeke, radi dalekovodnih trasa široke su stotinu i više metara – duž jednog kilometra voda predstavljaju stoga gubitak šume od desetak hektara. Održavanje i intervencije na dalekovodima dovode do neizbježnih šteta na poljoprivrednim parcelama.

Temeljenje stupova na skošenim terenima i krčenje zatečene vegetacije – osobito šumske – na takvim terenima remeti uspostavljen prirodni vodni sustav i dovodi do pojačane erozije, pa zna biti izvor iznenadnih klizišta tla većih razmjera.

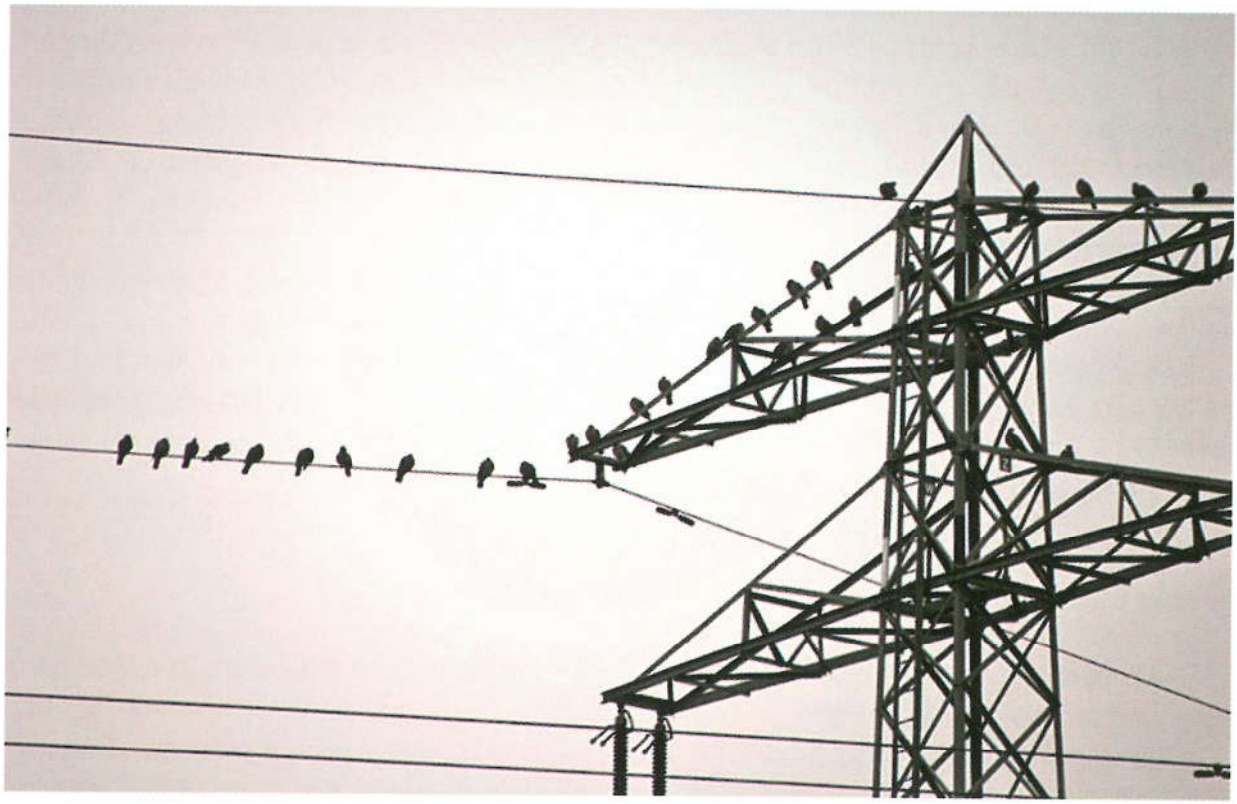
Stupovi dalekovoda visokog napona uobičajeno su visine 20 do 30 metara, u hrvatskim prosječnim prilikama, a vodiči su ovješeni tako da visinski zauzimaju prostor od oko 7 metara od tla do visine ovjesišta. To je područje u kojem stradavaju ptice, pa se dalekovodne trase nastoje voditi paralelno s poznatim putanjama ptica a izbjegavaju se križanja tih putanja i dalekovodnih trasa (slika 6.3). To je osobito važno u brdsko-planinskim područjima, gdje vodiči mogu biti na znatnim visinama od tla. Dakako, na jednak način dalekovodi predstavljaju opasnost za sportsku, gospodarsku i putničku avijaciju.

Kako bi se ublažio estetsko-vizualni pritisak na čovjeka, u posljednje vrijeme u mnogim zapadno-europskim zemljama dalekovodni se stupovi, pa i vodiči, prevlače zaštitnim premazom – uobičajeno zelene boje – što je nova agresija na okolinu kemijskim djelovanjem teških metala iz tih premaza na tlo. Zaštita od korozije, provedena pocinčavanjem unosi nepoželjni cink u okolno tlo.

Praktički: prijenosna mreža najagresivnija je svojim neizbježnim fizičko-materijalnim djelovanjem na okolinu. Kako je u pogonu pod visokim naponom, nepažljiv dodir ili pad vodiča pod naponom, zbog kvara, koji bi doveo do galvanskog kontakta ili nedopuštenog približavanja ljudi, životinja, drveća ili kakvih drugih civilizacijskih tvorevina, bio bi za ljude i životinje fatalan, a na materijalnim sredstvima mogao bi izazvati razaranja i požar (osobito šumski požar). Rizik se smanjuje zabranom postavljanja visokonaponskih dalekovoda iznad prostora naglašenog okupljanja ljudi ili visoke požarne i eksplozivne ugroženosti.

Električni utjecaji na čovjeka različito se tretiraju u pogledu potencijalnih izloženika. Ako je riječ o općem stanovništvu, konstrukcijskim se mjerama praktički onemogućuje akcident a rizik se svodi na onoliki koliki inače prihvaćamo prema akcidentima iz drugih brojnih civilizacijskih tekovina. Radi li se o radnicima elektroprivrede, profesionalcima, onda pretežu organizacijske mjere, provođenje kojih pruža punu sigurnost radnicima, a nepoštovanje može dovesti do ugrožavanja njihova života ili zdravlja.

Električna polja u prostoru kojeg zahvaćaju postrojenja i vodovi pod visokim naponom srazmjerna su tim naponima i obrnuto srazmjerna udaljenošću od vodiča. Djelovanje na čovjeka potencijalno je moguće dugotrajnim izlaganjem velikim vrijednostima tih polja. Stoga su propisima određene granične vrijednosti tih polja kojima se smiju izlagati radnici elektroprivrede prilikom osamsatnog dnevnog boravka u njima, te smanjene granične vrijednosti kojima smije biti izloženo opće stanovništvo stalnim boravkom u tim poljima. Granične vrijednosti poštuju se povoljnim udaljenostima dijelova pod naponom od tla a kontroliraju mjerenjem. Elektromonteri, kod rada u neposrednoj blizini vrlo visokog napona (ili čak u dodiru s dijelovima pod takvim naponom) primjenjuju posebne metode zaštite.



Slika 6.3. Ptice na dalekovodu u Nizozemskoj

Električna korona, lokalni električni proboj zraka u zonama najjačih električnih polja neposredno uz vodiče i na mjestima njihove nedovoljne zaobljenosti i glatkoće površine, izaziva čujni šum (na vodovima vrlo visokog napona), te predstavlja stanovito zvučno opterećenje okoline, no moguće ga je održavati na razumnoj mjeri. Kako je korona i izvor energetskih gubitaka u mreži, to se i s tog razloga njena pojava nastoji učiniti što manjom. Buku proizvode i energetski transformatori, brujanjem jezgre i radom rashladnih ventilatora.

Korona izaziva radio-smetnje na srednjovalnom području u stanovitoj užoj zoni dalekovoda, a dalekovod kao fizička metalna prepreka može ometati radio-prijem na ultrakratkom području ili prijem televizijskog signala, ali u manjim zonama *sjene*, jer je dalekovodna konstrukcija ipak dovoljno prozirna.

U normalnom pogonu, prijenosna mreža nije protjecana toliko velikim strujama da bi magnetsko polje uspostavljeno u okolini vodova moglo izazivati osjetnije efekte na biološkoj ili materijalnoj strukturi. Međutim, u prigodama kratkotrajnog kvara elektroprivredne mreže – pri kratkim spojevima između vodiča i zemljospojevima – teku struje znatno veće od pogonskih i mogu biti nesimetrične, te je povećano izmjenično magnetsko polje u okolini dalekovoda i postrojenja. Time se inducira napon u drugim metalnim objektima (drugim elektroenergetskim vodovima u blizini, žičnim telekomunikacijskim vodovima, metalnim konstrukcijama većih dimenzija – npr. žičanim ogradama ili žicama vinograda i voćnjaka). Pri projektiranju dalekovoda, taj se utjecaj utvrđuje i tehničkim mjerama svodi na neopasnu razinu. I za magnetska polja propisima su određene granične vrijednosti kojima se smiju izlagati radnici elektroprivrede, te smanjene granične vrijednosti kojima smije biti izloženo opće stanovništvo.

Struje kvara i galvanskim putem (time što su aktivni dijelovi dalekovoda ili postrojenja u kontaktu s neutralnim dijelovima, smišljenom ili neizbježnom) izazivaju opasnost na drugim nadzemnim i podzemnim instalacijama, ili prema čovjeku i životinji, što se manifestira naponom dodira i koraka. Također se svode na neopasnu razinu tehničkim zahvatima, te periodično kontroliraju.

Kako energetski transformatori, ali i neki drugi uređaji, sadrže velike količine ulja (najveći među njima: više desetaka tona), to u slučaju kvara može biti izvor velikog zagađenja okoline. Očigledno mora biti osiguran savladiv način sprečavanja širenja i gašenja eventualna požara kao i način sprečavanja nesmotrenog otjecanja ulja u okolinu – osobito u otvorene i podzemne vodotoke.

Dalekovodima i transformatorskim stanicama prenose se goleme snage koje opskrbljuju velika područja; nesmotreni ili neizbježni ispadi iz pogona predstavljaju trenutni prekid svih aktivnosti oslonjenih na korištenje električnom energijom, koji znaju pogoditi istodobno stotine tisuća ili čak milijune ljudi – bez mogućnosti najave. Doživljaji stresa, kolektivne psihoze i sličnih posljedica kod ljudi, te štete u proizvodnji i drugim djelatnostima, ne mogu se potpuno izbjeći i ponekad su naprosto fatalnih razmjera.

Djelovanje okoline na prijenosnu mrežu

No prijenosna mreža i okolina djeluju međusobno u oba smjera! Prijenosna je mreža izložena prirodnim aktivnostima i pojavama, te smišljenim i nepromišljenim aktivnostima ljudi.

Objekti prijenosne mreže, gotovo u cjelini, postavljeni su na otvorenom prostoru – stoga su neizbježni fizičko-kemijski utjecaji atmosfere na njih i oni u tom pogledu moraju imati zadovoljavajuću otpornost. Atmosferska električna pražnjenja (munje) mogu izazvati oštećenja previsokim naponom ili velikim strujama (slika 6.4). U tom su pogledu načelno otpornije mreže visokog

Slika 6.4. Udar munja u dalekovod u Rumunjskoj

Slika 6.5. Nanos leda na vodiču dalekovoda

napona od mreža nižih napona, jer je izolacija dimenzionirana za pogonske prenapone koji znaju biti istog reda veličine kao i prenaponske pojave uzrokovane atmosferskim pražnjenjem.

Snijeg i led mogu svojim prianjanjem uz elemente dalekovoda i postrojenja izazvati mehanička naprezanja veća od čvrstoće tih elemenata, te dovesti do kidanja i lomova (slika 6.5). Pridruži li se tome i snažni vjetar nepovoljnog smjera, šansa za havariju je povećana (slika 6.6). Dakako, objekti se dimenzioniraju za stanovite očekivane veličine tih pojava. No njihov je nastup određen hirom prirode i uvijek je moguće izvanredno odstupanje, na koje nije razumno dimenzionirati elemente, jer bi mreža bila preskupa.

Kiša, magla, sumaglica i rosa, isparivanja močvara, jezera i mora, tvore vlažni sloj na izolacijskim površinama elemenata prijenosne mreže, koji je električki to vodljiviji što je ta površina zagađenija nepovoljnim zagađivačima, ili zagađenjem koje su vodene čestice prikupile u zraku. U tom je pogledu neizbježna posolica koja se hvata na izložene površine u primorskom pojasu. Osim električki vodljivo, djeluje i korozijski agresivno.

Izvori zagađenja izolacije su i prašina iz tla (krupnije i tvrđe čestice djeluju i abrazivno), sredstva za agrokemijsko tretiranje tla (pesticidi, fungicidi, gnojiva), mnoge industrijske

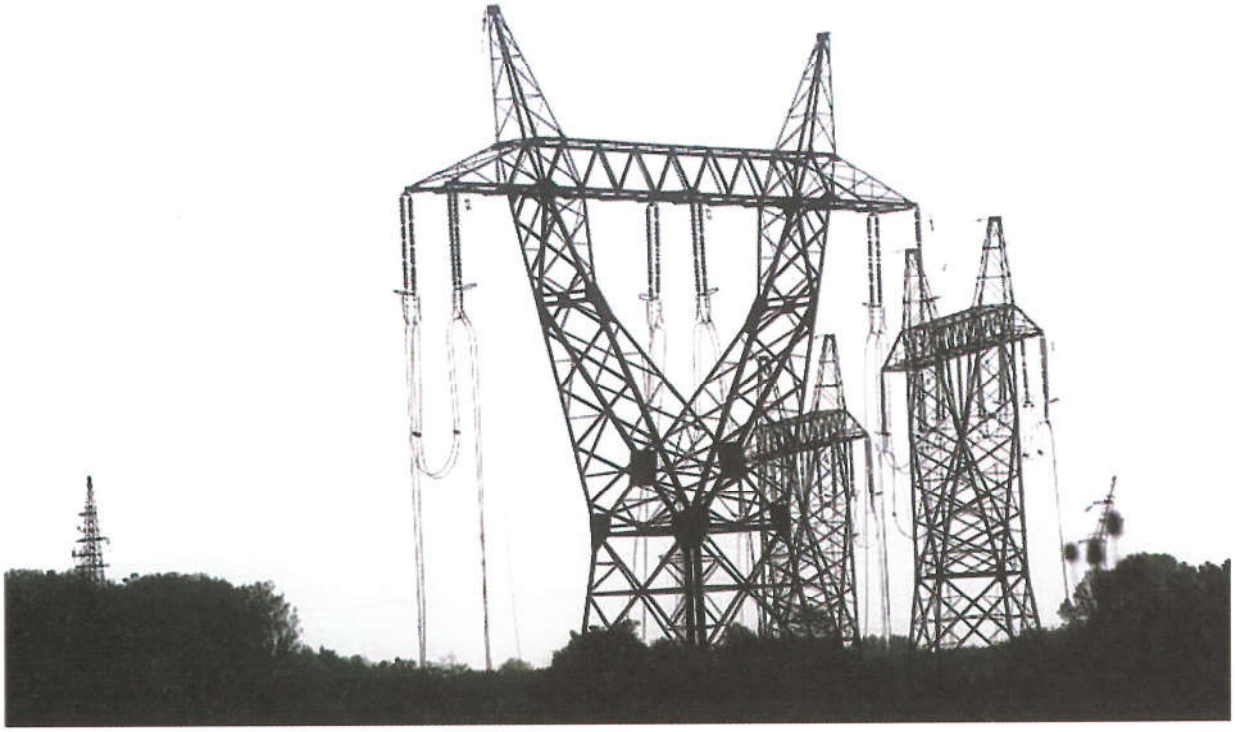
Slika 6.6. Rušenje stupa DV 400 kV *djelovanjem vjetra na zaleđene vodiče u Slavoniji*

djelatnosti (cementare, kemijska industrija, metalurgija, otvoreni rudokopi). Termoelektrane zagađuju finim česticama ugljena, sadržajem dimnih plinova (ugljikovi, sumporni i dušični spojevi, čestice), te sve to ovlažuju ishlapljivanjem vode iz rashladnih tornjeva. Vrlo nepovoljno! Ptičje tjelesne izlučevine su vrlo agresivne prema izolacijskoj površini; iznad ovjesišta izolatorskih lanaca susreću se *žičani ježevi* koji onemogućuju ptice da sjedaju baš na ta nepovoljna mjesta.

Preniska temperatura zraka može izazvati neželjeno mehaničko naprezanje zbog različitih koeficijenata toplinskog rastezanja materijala koji su u međusobnoj vezi ili nedovoljne rezerve za temperaturnu kompenzaciju. Previsoka temperatura zraka, ili lokalno povećano zagrijavanje zbog povećane apsorpcije Sunčeva zračenja, dovodi do smanjenja mogućeg strujnog opterećenja pojedinih dijelova prijenosne mreže. Jer dopušteno opterećenje uvjetovano je skupnim zagrijanjem, koje je rezultat zagrijanja iz okoline i zagrijanja zbog električne struje. Veća temperatura vodiča vodi njegovom većem istezanju, time i većem njegovu provjesu a manjoj udaljenosti između vodiča i tla; stoga je dopuštena ograničena maksimalna temperatura vodiča.

Nedovoljna briga o drveću u blizini dalekovodnih trasa može dovesti do nedopuštenog približavanja grana vodičima te do električnog preskoka. Na isti način mogu djelovati i veće ptice na vodovima i u postrojenjima neprevisokog napona, gdje svojim tijelom mogu izazvati električni preskok.

Čovjekove sveukupne djelatnosti mogu, osim zagađenjem, i na druge načine djelovati na prijenosnu mrežu. Ostali električki sustavi praktički ne djeluju na prijenosnu mrežu jer je njihov pogonski napon u pravilu znatno niži od uobičajenog za prijenos, te je realan sa-



Slika 6.7. Ratno razaranje dalekovoda u Slavoniji, 1991. godine

Slika 6.8. Ratno razaranje rasklopnog postrojenja 110 kV *u Slavoniji, 1991. godine*

mo obrnuti smjer utjecaja. Međutim, ostvaruju se neželjena fizička djelovanja nesmotrenim udarima prometnim sredstvima (vozilima, traktorima, letjelicama), kopanjem u blizini kabelskih trasa, nedopuštenim približavanjem (primjerice pri rušenju stabala u blizini vodiča nadzemnog voda), otuđivanjem dijelova čeličnih konstrukcija i sličnim štetama. Osobito štetna mogu biti ratna razaranja vodova i postrojenja koja – pored elektrana – predstavljaju jedan od glavnih ciljeva neprijateljskih napada i diverzija, jer sveobuhvatno i u duljem vremenu bitno ugrožavaju sposobnost obrane napadnutog područja (slike 6.7 do 6.9).

Konačno, objekti prijenosne mreže, ako se nađu u blizini posjeda ili čak trebaju proći preko posjeda (dalekovodi), neposredno i objektivno smetaju vlasniku ili ometaju njegovo korištenje posjedom (npr. avionsko tretiranje poljoprivrednih parcela, a otežavaju i rad ostale mehanizacije na tlu). Neposredne koristi baš od tog objekta taj vlasnik ne vidi ili doista teško vidi. Primjerice: jedan stanovnik novogradiškog kraja na čijoj je oranici dalekovodni stup 400 kilovoltnog voda Osijek–Zagreb dugog 250 kilometara (taj stup može zauzimati tlocrt otprilike 10 × 10 metara!), teško može sagledati značenje tog stupa za opskrbu baš njegova kraja električnom energijom. Zbog toga u fazi pripreme izgradnje velikih prijenosnih objekata okolina potencijalne lokacije trase može imati vrlo odbojan stav i ponekad može uvjetovati da trasa ne bude ekonomsko-tehnički najbolja, što predstavlja dalekosežni i trajni nepovoljni utjecaj na korištenje dalekovodom. Na sličan način mogu djelovati i neki drugi raniji *zauzimači* mogućih prostornih koridora te se u najnapučenijim područjima svijeta moraju naprosto revidirati zatečena iskorištenja takvih koridora radi nalaženja optimuma za sve (ceste, pruge, kanali, dalekovodi, vodovi nižeg napona i telekomunikacijski vodovi).

Slika 6.9. Ratno razaranje upravljačke prostorije TS 400/110 kV *Ernestinovo, 1991. godine*

Eto, smjestili smo prijenosnu mrežu u njezin prirodni, fizički i socijalni ambijent. Međuodnos elektroprijenosnih objekata i okoline prikazan je prema dosadašnjem stanju stvari. U ranijoj povijesti primjene trofaznog prijenosa električne energije nisu sva ta djelovanja bila toliko izražena, a neka niti danas u svim dijelovima svijeta nemaju jednaku težinu. Ili točnije: nisu sve zemlje svijeta toliko bogate da mogu svim djelovanjima osigurati jednak tretman. Iako prema tim djelovanjima njihovi stanovnici možda imaju jednak osjećaj. U tom smislu zadivljuje gledanje indijanskoga poglavice Seattlea, izneseno u znamenitom pismu američkom predsjedniku, polovinom pretprošlog stoljeća (1854). Poglavica se, u tom predivnom eseju posvećenom prirodi, boji da će *brbljave žice zamutiti pogled na brežuljke*, dakle strahuje od vizualno-estetskog opterećenja što ga bijeli čovjek unosi svojim telegrafskim vodovima u prirodu. Što bi tek osjećao premudri poglavica da uskrsne danas i ugleda žice koje istodobno nose svjetlo, pumpaju vodu, melju brašno, dižu ljude, pa čak i oganj zamjenjuju u vatrenom konju!?

Tijekom stogodišnjeg razvoja trofaznog prijenosa električne energije postupno se ubrzavao proces, koji je danas galopirajući: sve oštriji i brojniji zahtjevi prema mreži u pogledu zaštite okoline i sve veća i raznovrsnija agresija te iste okoline na mrežu.

7

Prije sto petnaest godina

Prije sto petnaest godina, 24. kolovoza 1891. godine, prvi put u svijetu ostvaren je prijenos električne energije na veliku udaljenost trofaznim vodom visokog napona. Taj prijenos sadržavao je sve jedinice današnjih trofaznih prijenosnih sustava: proizvodnja električne energije uz generatorski napon – transformacija na visoki napon – prijenos na veliku udaljenost – transformacija na niski napon – korištenje električnom energijom uz prikladan napon. Od tog datuma teče, dakle, svjetska povijest trofaznog prijenosa električne energije, kao i konačne i apsolutne prevlasti trofaznog sustava izmjenične struje za proizvodnju, za prijenos i za distribuciju električne energije.

Slika 7.1. Spomen-ploča s reljefnim likom Nikole Tesle (1856–1943) na Staroj gradskoj vijećnici u Ćirilometodskoj ulici u Zagrebu

Desetljeće ranije, 1882. godine, na Prvoj njemačkoj elektrotehničkoj izložbi u Münchenu demonstriran je prijenos električne energije istosmjernom strujom. Iste godine počele su raditi i prve javne elektrane u svijetu (Edisonova elektrana u New Yorku i elektrana u Londonu), iz kojih se električna energija distribuirala istosmjernom strujom, uz napon prilagođen žaruljama – stoga na malim udaljenostima od elektrane. Izložba u Münchenu naglasila je nužnost da se električna energija prenese s mjesta gdje ju je moguće povoljno proizvesti u većim količinama (pretvoriti iz raspoloživog primarnog oblika energije) na mjesto gdje je potrebno njezino iskorištavanje: gradovi (za rasvjetu) i industrija (za pogon).

U mjestu Miesbach, na generator od 2 konjske snage, uz istosmjerni napon od 2 kilovolta priključen je dvožični vod, duljine 57 kilometara, do Münchena. Na izložbi pogonjena je crpka, djelovanje koje se efektno demonstriralo umjetnim vodopadom. Ostvaren je stupanj djelovanja prijenosa od samo 22 posto. Tako je taj pothvat pokazao neprikladnost istosmjerne struje za svladavanje velikih udaljenosti: napon prijenosa mora biti usklađen s mogućnostima generatora (tada oko 2000 V) ali i korištenja električnom energijom (tada i danas: nekoliko stotina volta, za masovnu primjenu). Za veću snagu prijenosa, uz tako niski napon potrebna bi bila velika struja. Tolika struja zahtijevala bi veoma masivne vodiče za prijenos (neizvodljivo ili neprihvatljivo zbog visokih troškova izgradnje).

Izmjenična struja i izum transformatora (Gaulard i Gibbs, 1882, Blathy, Deri, Zipernovski, 1884) omogućuju transformaciju električne energije na poželjni napon. Radovi Tesle[45] (slika 7.1) i Dolivo-Dobrovoljskog osamdesetih godina pretprošlog stoljeća, utemeljuju teorijska i omogućuju praktična ostvarenja trofaznog sustava izmjenične struje za proizvodnju i prijenos električne energije. Odlučni poticaj izmjeničnom sustavu daje, na strani korištenja električnom energijom, zbog efektne pretvorbe u mehanički rad, Teslino rješenje indukcijskog, asinkronog elektromotora (1883).

Oskar von Miller[46] (slika 7.2), Nijemac koji će do vremena nakon Prvog svjetskog rata sudjelovati u teorijskim i praktičkim ostvarenjima na području elektrifikacije, zasnivanja elektroenergetskih sustava i javne elektroprivrede, a koji je zajedno s Francuzom Deprezom izveo münchenski istosmjerni prijenos, ostvaruje prvi trofazni prijenos električne energije,

---

[45] Nikola Tesla (1856-1943), iznimni svjetski izumitelj i genijalni vizionar u području elektrotehnike, jedan od najvećih znanstvenika u tehnološkoj povijesti čovječanstva. Rođen u Smiljanu, pokraj Gospića, umro u New Yorku. Najvažnija izumiteljska područja: indukcijski višefazni elektromotor, sustav prijenosa i razvođenja električne energije izmjenične struje, višefazni generator, regulacija, transformatori za vrlo visoke frekvencije, rendgensko zračenje, tehnika radija, elektrolučne svjetiljke, bežično daljinsko upravljanje, tehnika lasera i akceleratora atomskih čestica, kriogena tehnika, zamišljanje bežičnog prijenosa energije te korištenja kozmičkog zračenja, ... Njegov izmjenični sustav za prijenos i razdiobu električne energije te jednostavan asinkroni, indukcijski elektromotor omogućili su drugu industrijsku revoluciju (zamjenu parnih industrijskih pogona električnim pogonom). Njemu u čast nazvana je međunarodna jedinica za mjerenje magnetske indukcije (gustoće magnetskog toka), tesla (kraticom: T).

[46] Oskar von Miller (1855-1934) predstavlja iznimnu osobnost na području tehničke i industrijske kulture, vizionarski je inženjer i organizator, te gospodarstvenik, na prijelazu 19/20. stoljeća. Rođen je u Münchenu, otac Ferdinand vodio je svjetski čuvenu ljevaonicu željeza. Završio je Tehničku visoku školu u Münchenu, a 1882. godine – tada je bio 27-godišnjak, organizirao je Elektrotehničku izložbu u Münchenu i ostvario zajedno s Francuzom Marcelom Deprezom prvi prijenos istosmjernom strujom na veću udaljenost u povijesti. Od 1883. do 1889. godine, s Emilom Rathenauom, direktorom je Deutschen Edison-Gesellschaft, tvrtke kasnije poznatom pod imenom AEG. Godine 1891. organizira Internacionalnu elektrotehničku izložbu u Frankfurtu na Majni i ostvaruje prvi prijenos izmjeničnom strujom na veliku udaljenost, što predstavlja kamen temeljac u praktičnoj primjeni izmjenične struje. Godine 1903. osniva Deutsche Museum u Münchenu, jedan od najpoznatijih tehničkih muzeja na svijetu. Godine 1914. predsjednik je Udruge njemačkih inženjera (VDI). Od 1918. do 1924. godine vođa je projekta izgradnje tada najveće hidroelektrane na svijetu, HE Walchensee.

Slika 7.2. Oskar von Miller (1855–1934) u vrijeme organiziranja Elektrotehničke izložbe u Münchenu

za Internacionalnu elektrotehničku izložbu u Frankfurtu na Majni, 1891. godine (slika 7.3). Generator za taj prijenos izradio je Charles Brown, a elektromotor – na drugom kraju – Michael von Dolivo-Dobrovoljski.

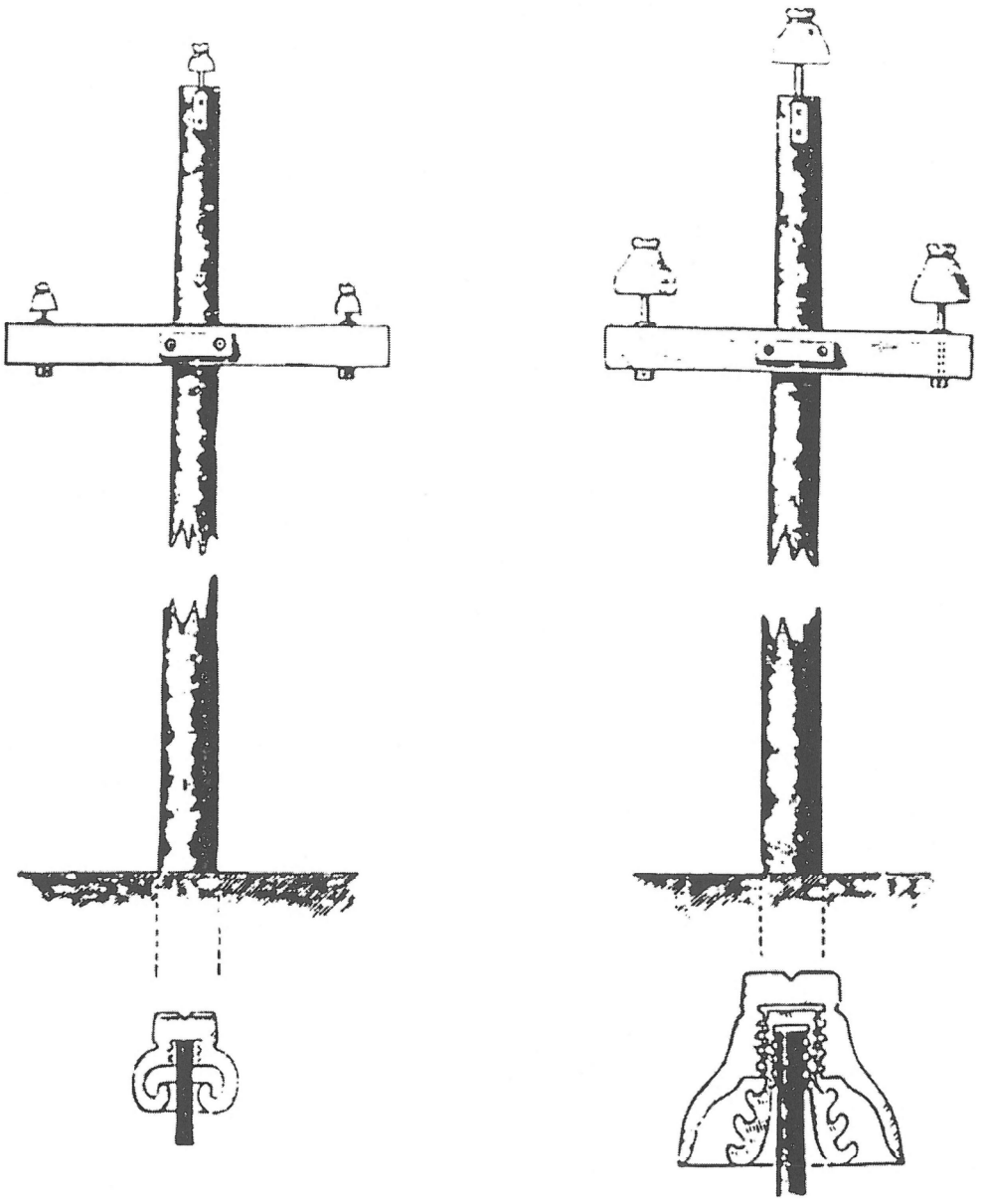
U hidroelektrani Lauffen na rijeci Neckar instaliran je trofazni generator snage 200 KS, napona 50 V, frekvencije 40 Hz. Energija je transformirana na napon 15 kV i vođena trofaznim vodom, izvedenim na drvenim telegrafskim stupovima i s porculansko-uljnim izolatorima, bakrenih vodiča presjeka 12,5 četvornih milimetara, dugim 175 kilometara do Frankfurta na Majni (slika 7.4). Ondje je transformirana na 100 V i iskorištena za pokretanje elektromotora 100 KS, crpke efektnog umjetnog vodopada visine 10 metara i za osvjetljenje s 1000 žarulja (slika 7.5). Na tako velikoj daljini, ostvaren je stupanj djelovanja prijenosa od 75 posto, što je tom početnom koraku dalo perspektivnu znakovitost. Transformatori u čvorištima su izvedeni u paru, te su se mogli kombinirati i serijski, čime se prijenosni napon udvostručavao, dokazujući utjecaj povećanja napona na smanjenje gubitaka prijenosa.

Višestruko je zanimljiva demonstracija vodopadom (kako u Münchenu – tako i u Frankfurtu)! Ponajprije, doslovce se prikazuje da je vodna snaga sa svog prirodnog mjesta prenesena na veliku udaljenost posredovanjem električne energije. S druge strane, zorno se naglašava da je električnu energiju pomoću elektromotora moguće efikasno transformirati u mehanički rad na mjestu iskorištenja. Rasvjetna namjena je u to doba već evidentna. Ko-

načno: estetsko-vizualna atraktivnost vodopada dokazuje spoznaju o takvoj potrebi, kao i smisao pionira elektroenergetike za efektnu promociju svojih dalekosežnih ideja.

Iste godine (1891) u Sjedinjenim Američkim Državama zaključen je ugovor o izgradnji hidroelektrane na slapovima Niagare i trofaznog prijenosa električne energije do Buffaloa.

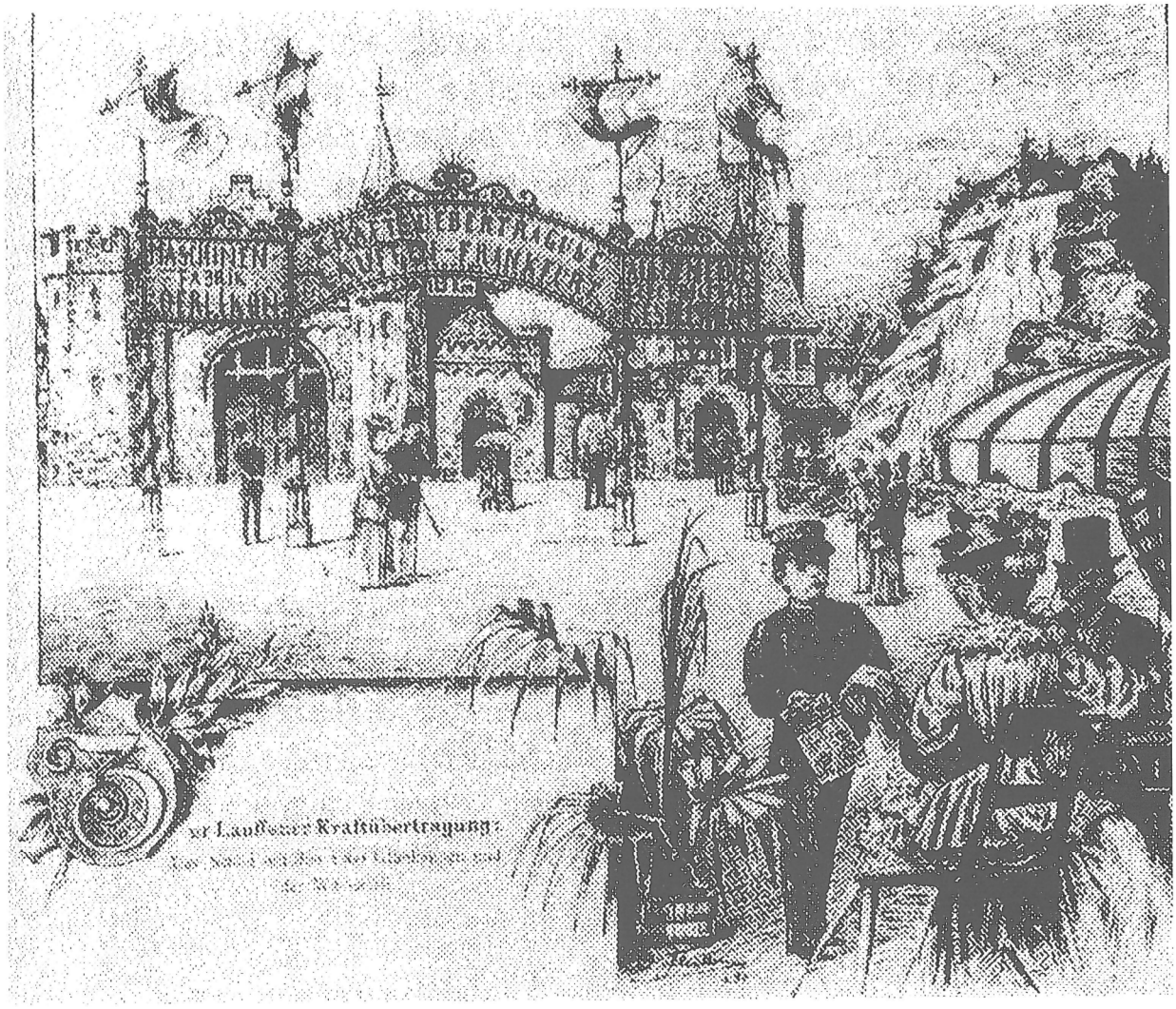
Slika 7.3. Internationale elektro-technische Ausstellung, Frankfurt am Main, 1891.



Slika 7.4. Drveni stupovi s porculansko-uljnim izolatorima na vodu Lauffen–Frankfurt

Duljina tog prijenosa je bila 32 kilometara, prijenosna snaga 7,5 MVA, a napon 11 kV. Zamisao je Teslina, a prijenos je u pogonu od 1896. godine. Pokazalo se da je moguće komercijalno graditi elektrane velikih snaga i prenositi njihovu proizvodnju na velike udaljenosti. Inače, prvi trofazni prijenos u Sjedinjenim Američkim Državama izgrađen je 1893. godine u Kaliforniji, duljine 12 kilometara, uz napon 2,5 kV. Na prijelazu stoljeća, prijenosu Niagara–Buffalo napon je povišen na 22 kV. U SAD-u se ustaljuje frekvencija izmjenične struje od 60 Hz, a u Evropi 50 Hz, što ostaje do danas.

Zanimljivo je to da je, godinu dana ranije od prijenosa Niagara–Buffalo, od 1895. godine u primjeni i naš prvi prijenos izmjeničnom strujom Krka–Šibenik. Tada je proradila javna hidroelektrana Krka, kasnije zvana HE Jaruga I (dvofazni generator snage 320 KS, 3000 V, 42 Hz), dvofazni vod duljine 11 kilometara pod naponom 3 kV i transformacija na napon 110 V u gradu Šibeniku.



Slika 7.5. Demonstracija umjetnim vodopadom i ulaz na Internacionalnu elektrotehničku izložbu u Frankfurtu u znaku prijenosa Lauffen–Frankfurt, 1891.

Tako se, paralelno na Starom i Novom kontinentu, posljednjih godina pretprošlog stoljeća usmjerava linija koja neće biti prekinuta sve do danas: put razvoja najprije razdvojenih regionalnih elektroenergetskih sustava (zajednički rad više elektrana, međusobno povezanih trofaznim vodovima), kasnije povezivanih na razini zemalja, a – potom – i na razini kontinenata.

8

Plodonosna eksplozija otkrića

Spoznavanje i ostvarenje bitnih praktičnih elektrotehničkih i s njima neposredno vezanih tehničkih rješenja nabujalo je osamdesetih, da bi se devedesetih godina pretprošlog stoljeća – nakon *eksplozije* – jednostavno *razlilo* po Starom i Novom svijetu oplođujući se bez prestanka sve do današnjih dana. Gotovo sve što smo koristili kao elektroenergetsko utemeljenje u tih više od stotinu godina, praktički smo naslijedili iz osamdesetih godina pretprošlog stoljeća:

- *na području pretvorbe mehaničkog u električni oblik energije*

– jednostepena parna turbina, Laval, 1883;
– vodna turbina, Pelton, 1884;
– višestepena parna turbina, Parsons, 1884;
– generator izmjenične struje, Gramme, Jabločkov 1878, Thomson, 1879;

- *na području prijenosa i raspodjele električne energije*

– transformator, Gaulard i Gibbs, 1882, Deri, Blathy, Zipernovski 1884;
– mogućnost prijenosa visokim naponom, Lačinov i Deprez 1881;
– sustav raspodjele električne energije, Edison, 1880;
– sustav električnog prijenosa snage, Tesla, 1888;

- *na području korištenja električnom energijom*

– elektrolučne svjetiljke, Jabločkov, 1876;
– elektrolučna peć, Wilchelm von Siemens, 1878;
– žarulja s ugljenom niti, Edison, 1879;
– električna lokomotiva, 1879;
– električni tramvaj, 1881;
– asinkroni motor, Tesla 1883, Ferraris 1885, Dolivo-Dobrovoljski 1889;
– elektrootporno, 1886. i elektrolučno zavarivanje, 1890;

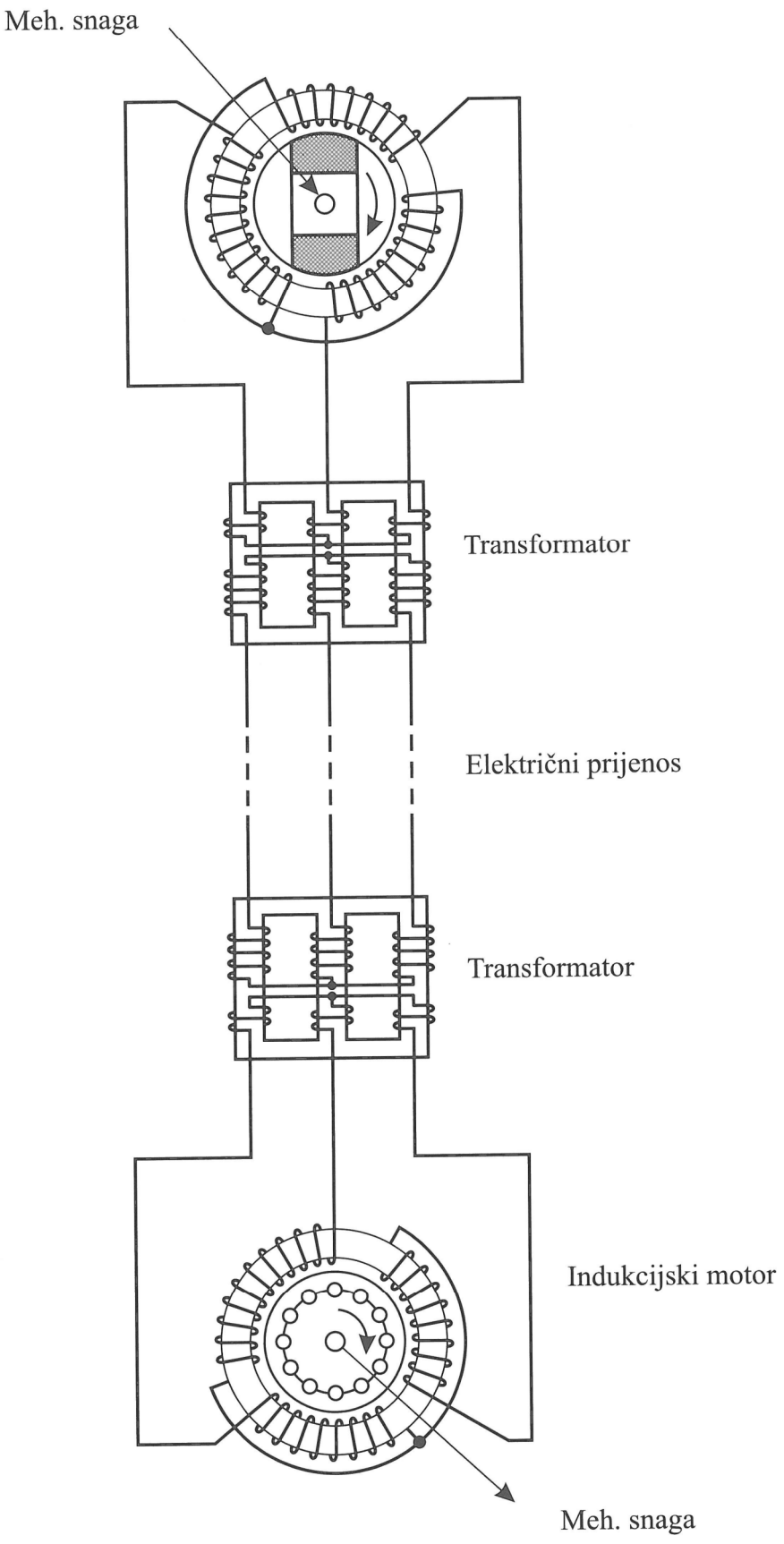
- *pojava javne elektroprivrede*

– prve javne elektrane, 1882;
– prvi prijenos istosmjernom strujom, 1882;
– prvi trofazni prijenos električne energije, 1891.

Svemu tome prethodila su elektrotehnička otkrića iz prve polovine pretprošlog stoljeća – izumom Alessandra Volte (Voltin članak, 1800), radovima Ampèrea, Ohma, Faradaya, Henrya, Kirchhoffa, okrunjeni općom teorijom elektromagnetskog polja koju je iznio James Clark Maxwell 1865. godine. U to vrijeme Werner von Siemens izgradio je dinamostroj i formulirao dinamoelektrično načelo (1866).

Za našu temu, prijenos električne energije, od iznimnog je značenja Teslina zamisao o električnom prijenosu snage na daljinu izmjeničnom strujom, patentirana 1888. godine[47]. Time je potpuno protegnuta jedna *crta*: od okretnog magnetskog polja, koje rotira u generatoru pogonjeno 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. Tamo trofazna struja u namotima induk-

[47] Teslin patent br.382.280 prihvaćen 1. svibnja 1888: *Electrical Transmission of Power*



Slika 8.1. Skica trofaznog električnog prijenosa prema Teslinoj zamisli

Slika 8.2. Prigodna poštanska marka prigodom 100-godišnjice trofaznog prijenosa

cijskog 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 povoljna udaljenost prijenosa uz ne prevelike gubitke (slika 8.1). Sve je ostvareno elektromagnetskom pretvorbom: u generatoru, u transformatorima i u motoru – bez komutatora[48], 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 pulsirajućoj 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.

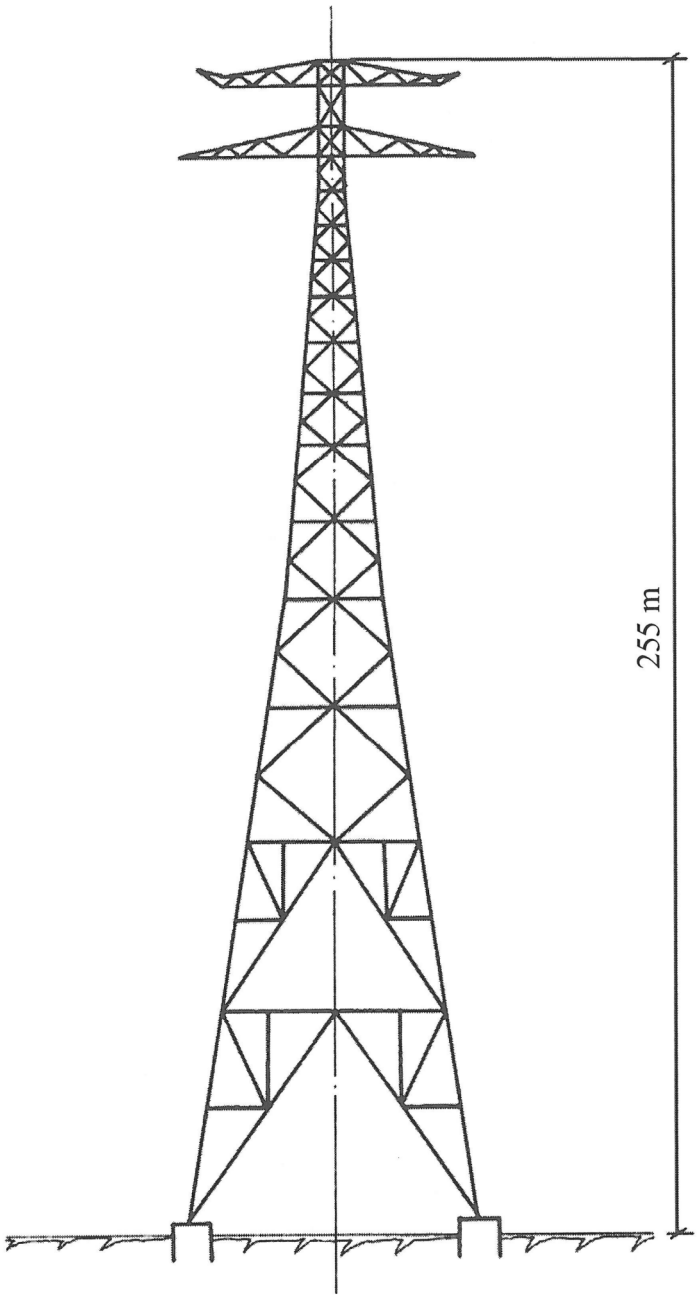
Budući da je prvi trofazni prijenos električne energije u svijetu stavljen u pogon 24. kolovoza 1891. godine, obilježena je u Njemačkoj istog dana 1991. godine stogodišnjica tog epohalnog događaja[49] (slika 8.2).

[48] Komutator je sastavni dio generatora i motora istosmjerne struje. Rotira zajedno s osovinom tih strojeva i omogućuje povoljan kontakt s poželjnim vodičima namota na izlazu iz generatora odnosno ulazu istosmjerne struje u motor. Mijenja (*komutira,* odatle naziv) smjer struje koja teče vodičima u rotoru stroja, tako da je taj smjer uvijek isti pred sjevernim odnosno južnim magnetskim polom, sukladno napredovanju vrtnje stroja. Time se ostvaruje ustrajan smjer sile na vodiče rotora tijekom vrtnje. Komutatorske lamele spojene s rotorskim namotom, smještene na obodu komutatora učvršćenog na rotor, preko mirnih četkica učvršćenih uz stator stroja, omogućuju komutaciju. (Razlikovati treba komutator od kolektora. Ako je primjenjen, kolektor *(skupljač)* je klizni prsten pričvršćen na osovinu rotora stroja koji putem četkica omogućuje trajni električki spoj s rotorskim namotom, dakle bez komutacije.)

[49] Drehstromtechnik heute und morgen (povodom 100-godišnjice prvog trofaznog prijenosa, 1891-1991). VDE-Verlag, Berlin-Offenbach, 1991

U odnosu na sadašnje dostignuto stanje ukupnih instaliranih snaga velikih elektrana, u zemljama s najvećim udaljenostima između (a) područja s izvorima primarne energije ili/i rashladnim mogućnostima za pogon konvencionalnih ili nuklearnih termoelektrana i (b) urbano-industrijskih područja, danas su u primjeni najviši naponi trofaznih prijenosa izmjenične struje:

- Rusija 1150 kV,
- Sjedinjene Američke Države 765 kV,
- Kanada 735 kV,
- Japan 500 kV.



Slika 8.3. Stup na prijelazu DV 2 × 500 kV *preko Xi-Jianga u Kini*

Najviši pogonski napon je na prijenosu Ekibastuz–Kokčetav u Rusiji, 1150 kV, duljine 432 kilometra. U zemljama Europske Unije do prijema 10 novih članica (2004), najviši napon u primjeni bio je 400 kilovolta, ali do Mađarske, Poljske, Rumunjske i Bugarske dopiru radijalni vodovi 750 kilovolta iz Rusije, preko Ukrajine.

Najviši dalekovodni stup na svijetu je na prijelazu dvostrukog 500 kilovoltnog voda preko rijeke Xi-Jiang u Kini, stupovi su visoki 255 odnosno 240 metara (slika 8.3). Dakle: tri četvrtine visine Eiffelova tornja (324 metra). Najviši dalekovodni stup u Europi neznatno je niži. Nalazi se na prijelazu rijeke Elbe kod Hamburga četverostrukim vodom napona 400 kV. Tu su stupovi visoki 227 metara.

Raspon među stupovima na prijelazu Xi-Jiang je 1547 metara, a na prijelazu Elbe oko 1200 metara. Najveći raspon na svijetu je na prijelazu fjorda Ameralik na Grenlandu, ima duljinu 5376 metara! Na prijelazu fjorda Sogna u Norveškoj razmak među stupovima je 4888 metara. Prijelaz Mesinskog tjesnaca, između Sicilije i Kalabrije ima raspon od 3627 metara.

Najdeblji dalekovodni vodič u Europi povezuje Europu s Azijom na prijelazu dvostrukog 380 kilovoltnog dalekovoda preko Bospora. Raspon je 1757 metara, stupovi su visoki 124 metra, a fazni vodiči su iz složene konstrukcije. Jezgra je izrađena iz užeta spletenog od čeličnih žica prevučenih aluminijskim omotačem (tzv. Stalum), presjeka 230 četvornih milimetara. Oko toga je oplet žica od aluminijske legure presjeka 1800 četvornih milimetara. Vanjski promjer užeta je gotovo 6 centimetara!

Apsolutni svjetski *rekorderi* u pogledu prijenosa električne energije nisu iz područja trofaznih izmjeničnih prijenosa, razvoj kojih pratimo već više od stotinu godina. Granična ostvarenja postignuta su prijenosom istosmjernom strujom i to:

– najviši napon između dva vodiča je 1200 kV na istosmjernom prijenosu ±600 kilovolta od hidroelektrane Itaipu do Sao Paola;

– najveća prijenosna moć nadzemnog voda je također na prijenosu Itaipu, gdje se prenosi 6300 megavata na udaljenost od oko 800 kilometara, pomoću dva paralelna dvožična voda;

– najdulji prijenos je Inga–Shaba u Demokratskoj Republici Kongo, gdje se na udaljenost od 1700 kilometara (to je daljina poput zračne udaljenosti Zagreb–Madrid) prenosi 560 megavata, uz napon ±500 kV;

– najdulji podmorski kabelski prijenos je Baltic-Cable, između Njemačke i Švedske, duljine 250 kilometara, pod istosmjernim naponom 400 kV prenosi se 600 MW, a u izgradnji je još dulji kabelski prijenos NorNed, duljine 580 kilometara, između Norveške i Nizozemske;

– konačno: najsnažniji podmorski prijenos je između Francuske i Engleske; ispod La Manchea prenosi se 2000 MW pomoću osam jednožilnih kabela istosmjernog napona 270 kV.

Dakle, naš *stopetnaestgodišnjak* ne može osigurati – pri graničnim zahtjevima – ono što može učiniti njegov istosmjerni suparnik, čiji je zamah nastupio sedamdesetih godina prošlog stoljeća, primjenom poluvodičkih tiristorskih usmjerivača.

Što nas čeka u narednih stotinu godina?! Potencijalni revolucionarni skok moguće je nazrijeti: to je praktično i ekonomski prihvatljivo ostvarenje materijala koji bi bio električki supravodljiv na temperaturi Zemljine atmosfere. Kada? Moguće: nikad!

9

Skladnom dopunom do elektroenergetskog sustava

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 elektrana

Počnimo s najrazumljivijim. Ako bi se jedan zaokruženi konzum želio opskrbiti jednom termoelektranom, snaga koje je podjednaka 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. Konzum bi bio zadovoljen 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 (ljeto) nije dovoljan samo jedan agregat. Najvjerojatnije, trebalo bi ugraditi još jedan agregat da se ostvari povoljna sigurnost: u razdobljima kada trebaju biti dva u pogonu – treći je u rotirajućoj 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 rotaciji neprekidno barem 50 posto više snage nego što 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 iz hidroelektrane (nema troškova za gorivo, postoje samo fiksni troškovi). Međutim, koliku bi snagu isporučitelj smio jamčiti potrošačima? Samo onoliku kolika odgovara dotoku vode u najsušnijim okolnostima. To je najčešće znatno manje od prosječnih okolnosti, te bi takva hidroelektrana zapravo nerazumno zauzimala 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 "besplatne" 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 veoma skupo. Ostvarili bi se i preljevi vode, jer termoelektrana ne može biti u pogonu ispod 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.

Stvarnih takvih rješenja je bilo u nas, primjerice, u Požegi. Tamo je od 1912. godine u pogonu javna hidroelektrana "Kuzmica" na Orljavi koja je imala hidrogenerator od 215 kVA i dizelgenerator od 155 kVA, te priključni dalekovod pod naponom 6 kV do grada. Samo takvim – kombiniranim – rješenjem moglo se *krenuti* sa širom elektrifikacijom domaćinstava i proizvodnih pogona. S druge strane, tarifnim sustavom, pa i ograničenjem uključenja pojedinih kategorija u pojedinim dnevnim razdobljima, usmjeravao se dnevni raspored potražnje u skladu s mogućnostima elektrane, a ne u skladu s izvornim potrebama potrošača.

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 veoma 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 praktički potpuno neiskorišten.

Ilustrativan je, opet, stvarni primjer. Javna termoelektrana ("Munjara") u Osijeku, zajedno s visokonaponskom (3 kV) razvodnom gradskom mrežom puštena je u pogon 1926. godine. Imala je dva turbogeneratora od po 1,1 MVA. Kako bi se osigurali što bolji uvjeti poslovanja – što brže nakon puštanja u pogon, godinu dana ranije razvila se zavidna marketinška aktivnost:

– objavljivanje tehničkih uvjeta za priključak na mrežu;

– objavljivanje uvjeta isporuke energije i tarifnog sustava, za domaćinstva i industriju;

– davanje ovlaštenja obrtnicima za izradu instalacija i priključaka te preradu plinskih svjetiljaka u električne;

– osiguravanje sredstava za kreditiranje izvedaba instalacija.

Uspjeh nije izostao. Prve godine pogona, iskorištenje je u odnosu na mogući plasman bilo već 33 posto, druge godine 50 posto, pete godine 66 posto. Ali takvo pozitivno kretanje ima i svoju negativnu stranu: trebalo je hitno dograditi elektranu. Već 1938. godine morao je biti u pogonu novi agregat od 2,5 MVA. Ubrzo nakon rata (Drugog svjetskog) sve je to bilo nedovoljno; formira se regionalni elektroenergetski sustav koji *okuplja* sve elektrane i sve potrošače na širem području.

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*[50].

Sve neprilike spomenute s početka, 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 se grade 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

[50] power system, electric power system (engl.), Elektrizitätsversorgungssystem (njem.)

energije). U takvom sustavu prihvatljiva je i izgradnja velikog akumulacijskog bazena, jer će se njegovi veliki stalni troškovi rasporediti na veliku količinu ukupno isporučene energije.

Želimo ponovno naglasiti: konačni proizvod javne elektroprivrede – električna energija – raspoloživ za distribucijski sustav radi dovođenja do kupaca (potrošača), 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 jeftinija, međutim, izvan elektroenergetskog sustava 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, te njihov zbroj može biti znatno ravnomjernije raspoređen tijekom cijele godine od rasporeda u svakoj regiji za sebe. Da se obuhvate i dovoljno različita klimatska područja, to traži 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 potražnji 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 ubrzanijem 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 kakvog malog nekonvencionalnog izvora. Ako je trošak izgradnje tog izvora veći od troška izgradnje dalekovoda, razumnije je izgraditi vod. Osim smanjenja gubitaka u mreži, on će dovesti i do povećanja sigurnosti pojedinih čvorišta prijenosne mreže.

Pokazalo se da je gradnja elektrana velikih snaga ekonomičnija, ako se ugrađuju veće generatorske jedinice. Te se elektrane mogu bolje iskoristiti, a može se osigurati kontinuirana opskrba potrošača, kad su međusobno povezane dalekovodima. To međusobno povezivanje i opskrba udaljenih potrošačkih područja značilo je stvaranje prvih prijenosnih mreža i prvih elektroenergetskih sustava.[51]

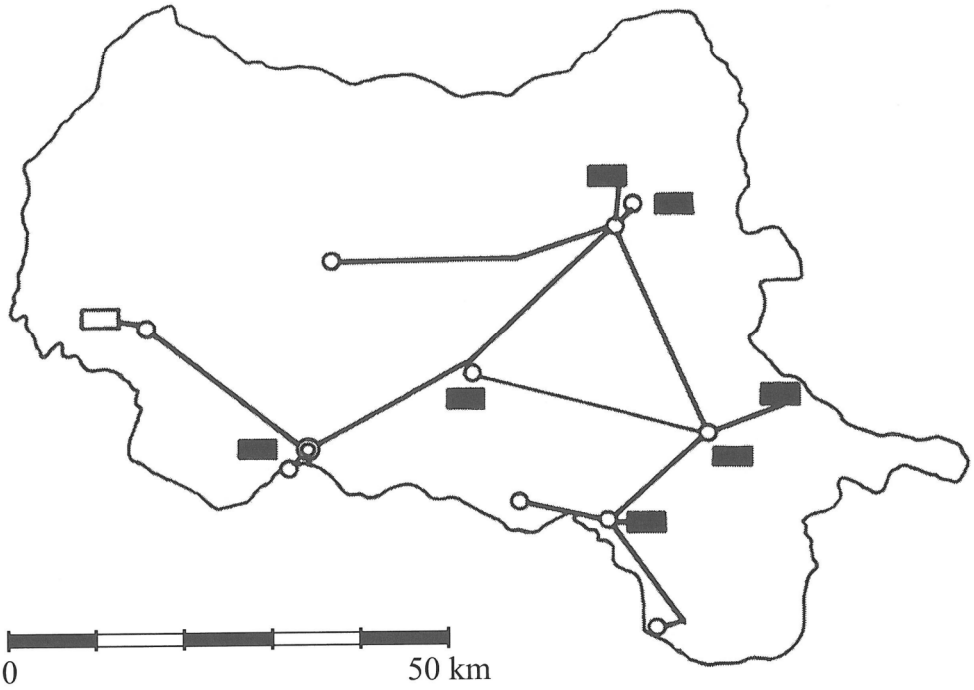
Zadatak je elektroenergetskog sustava opskrba kupaca (odnosno njihovih trošila) električnom energijom. U tome sudjeluju svi dijelovi sustava: generatori, transformatori, vodovi. Električna energija koja se predaje potrošačima mora biti kvalitetna. Mjerila kvalitete su frekvencija, napon i raspoloživost.

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 različim karakteristikama i lokacijama. Drugim riječima, prijenosna mreža omogućuje ekonomično i sigurno vođenje elektroenergetskog sustava (dispečiranje, odnosno raspodjelu električne energije).[52]

---

[51] H. Požar: Snaga i energija u elektroenergetskim sistemima. Prvi svezak, drugo izdanje. Informator-Zagreb, 1983. Str.11

[52] M. i K. Ožegović: Električne energetske mreže. Svezak I. FESB-Split, 1996. Str.1-2



Slika 9.1. Primjer regionalnog sustava: mreža 35 kV *u Slavoniji i Baranji, 1956. godine*

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*[53]. Te četiri jedinice tvore jednu cjelinu. Međusobno su galvanski ili elektromagnetski povezani. Svaka jedinica radi kao neodvojiv dio sustava.[54]

Najvažnije zadaće elektroenergetskog sustava proizlaze iz fizikalne naravi električne energije – neodvojive od mreže i neuskladištive, a to su: namirenje promjenjive potražnje, najpovoljnije iskorištenje izvora primarne energije i osiguranje rezerve.

Već početkom 20. stoljeća nastaju regionalni sustavi, (slika 9.1), potom sustavi na državnoj razini, a već više od pola stoljeća traju i međudržavna povezivanja.

Prijenosna mreža i elektroenergetski sustav

Uobičajena je podjela (elektroenergetskog) sustava na izvore, prijenosnu mrežu i distribucijsku mrežu. To je podjela po tzv. fazama tehnološkog procesa. Tu se pod izvorima smatraju elektrane, dok 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 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 te mreže uvjetovano prvenstveno potražnjom električne energije, bez obzira na nazivni napon.

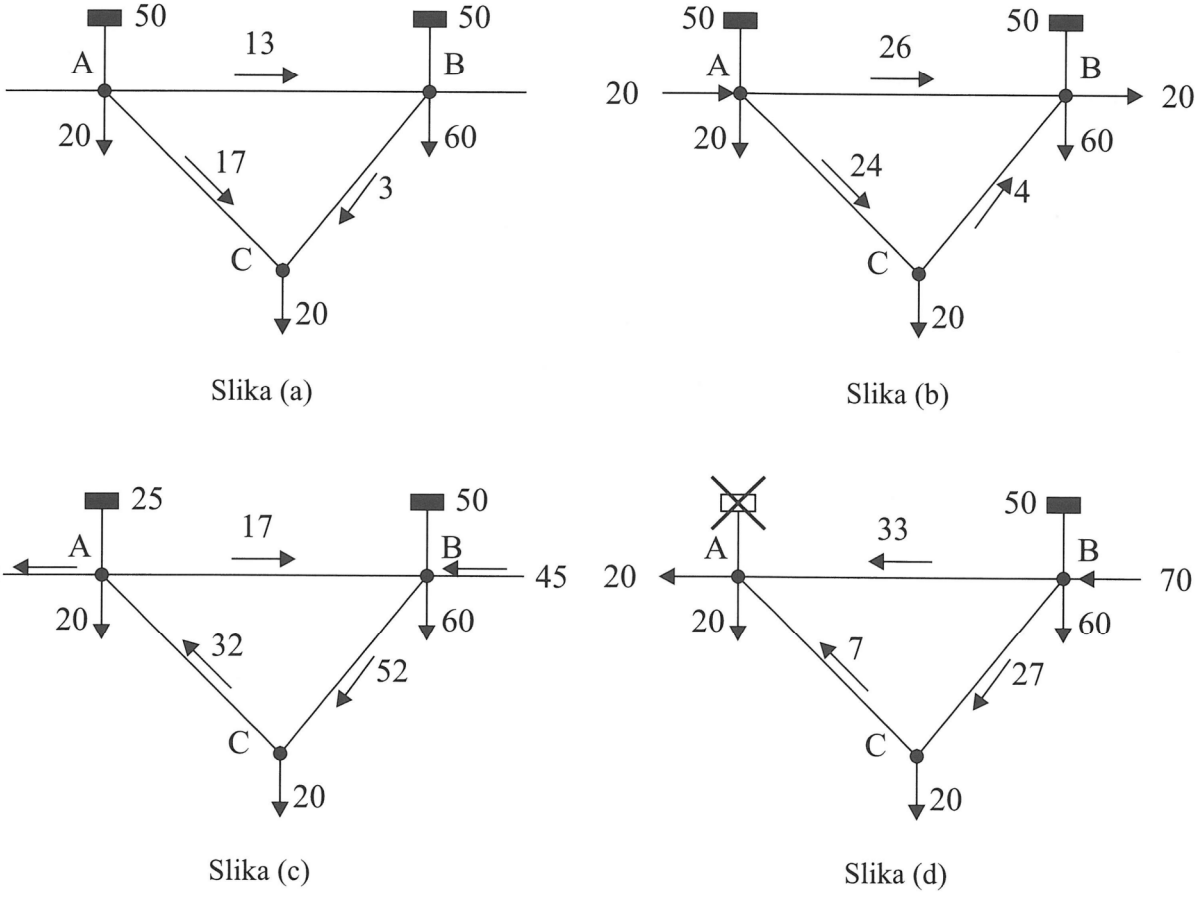
[53] consumer (engl.), Verbraucher (njem.)
[54] S.Despotović: Osnovi analize elektroenergetskih sistema. ZJE-Beograd, 1962. Str.15

Za ilustraciju pogleda na funkciju pojedinog voda što je ima u mreži neka posluži primjer nekoga zamišljenoga grada koji ima tri čvorišta u prijenosnoj mreži i na dva čvorišta priključene elektrane od po 50 MW (slika 9.2). Neka je opterećenje ta tri čvorišta u nekom trenutku upravo 100 MW (jednako 20+20+60). U prvom slučaju neka su elektrane u punom pogonu i neka nema ikakve razmjene sa susjednim prijenosnim mrežama, priključenim na čvorišta A i B. Tokovi snage po vodovima bit će određeni Kirchhoffovim zakonima i oni će biti kako je prikazano na slici (a). (Mreža je radi jednostavnosti u ovom primjeru idealna, nema gubitaka, a sva tri voda imaju jednaku impedanciju.)

Ako, u istim okolnostima potražnje, postoji i razmjena sa susjednim mrežama, takva da u čvorište A ulazi 20 MW i istodobno iz čvorišta B izlazi 20 MW, prilike se mijenjaju, slika (b). Dok su opterećenja distribucijskih vodova ostala po veličini i smjeru jednaka, dotle su se u prijenosnoj mreži promjenile veličine opterećenja, pak u vodu B–C čak i smjer!

Okrenimo sada smjer razmjene i zamislimo da je elektrana u čvorištu A angažirana s polovinom snage, u čvorište B neka stoga ulazi 45 MW a iz čvorišta A neka izlazi 20 MW, slika (c). Opterećenja prijenosnih vodova ponovno se mijenjaju, a i smjerovi toka snage vodovima A–C i B–C. Distribucijski vodovi i dalje povlače iste snage.

U zamislivom četvrtom slučaju, slika (d), uz nepromijenjena opterećenja u distribucijskoj mreži, elektrana priključena na čvorište A je neraspoloživa, recimo da je u remontu. Nedostatak proizvodnje sav se nadoknađuje povećanjem dobave u čvorište B iz susjedne



Slika 9.2. Mreža A–B–C uz raznoliki angažman elektrana i dobave iz susjednih područja (impedancije vodova A–B, B–C i A–C međusobno jednake, nema gubitaka u mreži)

prijenosne mreže, dakle dobava je odatle povećana za 50 MW. Sada se ponovno mijenjaju sve veličine opterećenja vodova prijenosne mreže, a i smjerovi toka snage vodovima A–B i A–C.

Dakle, mreža A–B–C prijenosna je mreža po svojoj funkciji, jer su njezini vodovi opterećeni prvenstveno ovisno o angažmanu elektrana, a podmreže vezane na čvorišta A, B i C distribucijske su jer je opterećenje njihovih vodova ovisno isključivo o potražnji.

10

Povezivanje elektroenergetskih sustava

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.

Rotirajuća 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.

Elektroenergetske interkonekcije

Povezivanjem više državnih (ili unutardržavnih, u država velikih prostornih obuhvata) elektroenergetskih sustava nastaju *elektroenergetske interkonekcije*[55] (interkonektirani elektroenergetski sustavi) i to radi:

– potpunijeg iskorištenja novih velikih ekonomičnih elektrana, dakle njihova potpunog angažiranja odmah nakon izgradnje;

– boljeg kombiniranja različitih hidroloških i potrošačkih karakteristika pojedinih sustava, izbjegavanja preljeva u hidroelektranama i smanjenja utroška goriva u termoelektranama;

– smanjenja rotirajuće 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.

Dakako, u manjoj mjeri sve to postiže se već pri oblikovanju državnog elektroenergetskog sustava. Međutim, interkonekcijom takvih sustava dolazi do još naglašenijih koristi.

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[56] (uz Francusku, obuhvaća Portugal i Španjolsku) i 1964. godine zemlje interkonekcije SUDEL[57] (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;

---

[55] 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; interconnectors (engl.); Verbindungsleitungen (njem.).

[56] Union Franco-Ibérique pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Electricité

[57] Groupe Régional pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Energie Electrique entre l'Austirche, la Grèce, l'Italie et la Yougoslavie

– sjevernoeuropska interkonekcija NORDEL[58], koja od 1963. godine obuhvaća Dansku, Finsku, Norvešku, Švedsku i Island (Island, u odvojenomu radu);

– istočnoeuropski objedinjeni energetski sustav OES[59], od 1960. godine, interkonekcija koja je obuhvaćala europske zemlje-članice nekadašnjeg Savjeta za ekonomsku pomoć (SEV[60]): Bugarsku, tadašnju Češkoslovačku, Mađarsku, tadašnju Njemačku Demokratsku Republiku, Poljsku, Rumunjsku i jugozapadni dio jedinstvenog elektroenergetskog sustava tadašnjeg SSSR (Moldavija i Ukrajina);

– EES[61] SSSR, jedinstven energetski sustav tadašnjeg SSSR-a, nastao šezdesetih-sedamdesetih godina prošlog stoljeća, koji je obuhvaćao devet objedinjenih elektroenergetskih sustava u toj zemlji (od ukupno jedanaest, s gotovo 100 područnih sustava), u europskom i azijskom dijelu.

Interkonekcija UKTSOA[62] obuhvaća sustav Engleske i Walesa, te koordinira dobavu iz Škotske i uvoz iz Francuske. Konačno, ATSOI[63] je interkonekcija koja obuhvaća sustave Republike Irske i Sjeverne Irske. To su dvije manje europske interkonekcije.

Na sjevernoameričkom kontinentu uspostavljeno je više interkonekcija koje obuhvaćaju elektroenergetske sustave SAD-a, a neke i dijelove kanadske mreže.

I Japan predstavlja veliku interkonekciju jer se, zbog teritorijalne raspodjele na otoke različitih pogonskih frekvencija (Hokaido i sjeverni dio Honšua: 50 herca, zapadni dio Honšua, Šikoku i Kijušu: 60 herca) i različitih nazivnih napona mreže, najprije razvilo više samostalnih elektroenergetskih sustava.

Povijesni put europskih interkonekcija

Uspostavljene europske elektroenergetske interkonekcije imale su stanovite prirodne i razvojne osobitosti. Dijelom ih te osobitosti čine komplementarnim – te ih potiču na međusobno povezivanje, a dijelom su takve da čine teškoće pri eventualnom povezivanju:

– zemljopisni položaj duž crte istok-zapad: vrh potražnje pomiče se dnevno sa Suncem;
– usto je istok suficitaran primarnim izvorima energije, a zapad uglavnom deficitaran;

– zemljopisni položaj duž crte sjever–jug: vrh potražnje pomiče se sezonski, ljeti prema jugu a zimi prema sjeveru, usto ekološki preopterećen središnji prostor, dok je u tom pogledu slabije opterećen sjever i jug;

– udio hidroenergije u ukupnoj proizvodnji električne energije;

– udio nuklearnih elektrana u termoelektranama;

– regulacijska svojstva elektrana i sustava;

– zemljopisne prepreke (morski razmaci);

– globalno-političke prepreke.

---

[58] Organisasjon for nordisk elsamarbeid (šved.)

[59] Объединенные енергосистемы (rus.)

[60] 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.

[61] Единой енергосистемы (rus.)

[62] United Kingdom Transmission System Operators Association

[63] Association of Transmission System Operators of Ireland

Najvažniji pogonski značaj imala je razlika u načinu regulacije frekvencije i snage što je dovelo do razlike u veličini i trajanju odstupanja frekvencije od nazivne: u interkonekciji UCPTE ta su odstupanja bila manja i trajala su kraće, a u interkonekciji OES veća i dugotrajnija. To je bio nezaobilazan razlog nemogućnosti neposrednog paralelnog rada te dvije interkonekcije, isto tako i interkonekcije NORDEL s interkonekcijom EES SSSR. Uspostavila se svojevrsna europska *strujna granica* među tim grupama zemalja. Premda su te zemlje u kopnenom dodiru, a ostale njihove različitosti su takve da upravo privlače na povezivanje radi energetsko-ekonomskih dobitaka.

Povezivanje interkonekcija UCPTE i OES ostvareno je stoga izgradnjom tri skupocjene usmjerivačke stanice: u Dürnrohru (Austrija–tadašnja Češkoslovačka, 1983. godine, to je bio strujni prodor kroz *željeznu zavjesu*), Etzenrichtu (Njemačka–Češka, 1993) i Beču (Austrija–Mađarska, 1993), tako da je omogućena ukupna snaga razmjene od 1750 MW. NORDEL je bio povezan s interkonekcijom EES SSSR usmjerivačkom stanicom Vyborg u Finskoj, snage 1070 MW, u pogonu od 1982. godine. U usmjerivačkim stanicama ispravlja se najprije izmjenična struja jednog sustava u istosmjernu, a potom se ta istosmjerna struja izmjenjuje u izmjeničnu struju drugog sustava. Tako je moguće povezati dva sustava izmjenične struje različitih regulacijskih osobina, štoviše i različite nazivne frekvencije.

No, i nakon razdoblja *hladnog rata*, blokovski interesi i unutarblokovska sigurnost priječile su širu orijentaciju na povezivanje europskog zapada s europskim istokom. Štoviše, u istočnoeuropskom bloku oblikovala se mreža najvišeg napona tako da je skoro svaka članica bloka imala jedan radijalni krak pod naponom 750 kV koji je počinjao u tadašnjem SSSR a završavao u pojedinoj zemlji, bez međusobnog povezivanja tih završetaka. Time je *stariji brat* držao svakog trena u rukama operativno funkcioniranje ostale braće, bez mogućnosti da si oni međusobno priskoče u pomoć.

Zapadnoeuropske zemlje – opet – susprezale su se od dugoročne elektroenergetske ovisnosti o drugoj državi premda unutar iste interkonekcije i iste globalno-političke pripadnosti. Dobava električne energije se ne može operativno nadoknaditi ako susjedi zataje, za razliku od drugih energenata. Ipak, energetsko-ekonomske prednosti snažnije su djelovale od strategijskog opreza: unutar UCPTE-a 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-a 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.

Nakon *perestrojke* i *pada Berlinskog zida* (1989), društveno-političkih promjena u SSSR-u (1991) i istočnoj Europi, te rata na prostoru bivše Jugoslavije (1991–1995), nastupaju promjene, kako unutar zatečenih europskih interkonekcija – tako i u umnožavanju njihova međusobnog povezivanja.

Najprije je 1992. godine u Pragu osnovana nova interkonekcija CENTREL[64], kojoj su pristupili elektroenergetski sustavi Češke, Mađarske, Poljske i Slovačke, s jednim od najvažnijih ciljeva: prilagođenje mreže radi integracije u UCPTE. Od 1993. godine isključene su veze prema interkonekciji EES bivšeg SSSR-a. Jugozapadni dio Ukrajine, također je odvojen od interkonekcije EES.

Nijemci, u jednoj državi (ujedinjenoj od 3. listopada 1990. godine), žurno su gradili četiri 400 kilovoltna poteza, kako bi nove savezne države izdvojili iz interkonekcije OES i

[64] 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.

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. Kada se prilike na području sadašnje Zajednice Neovisnih Država[65], odnosno Rusije stabiliziraju, moguće je da postojeće usmjerivačke stanice (Dürnrohr, Etzenricht i Beč) budu preseljene na novu europsku istočnu elektroenergetsku granicu, jer su na postojećim lokacijama postale bespredmetne.

Interkonkcije NORDEL i UKTSOA odjeljuju prema UCPTE-u morske prepreke takve duljine da se ne mogu premostiti primjenom kabela izmjenične struje[66], ekonomičnijom od primjene prijenosa istosmjernom strujom.

Nekoliko podmorskih kabela istosmjerne struje povezuju zemlje NORDEL-a, 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.

Najsnažniji podmorski kabelski prijenos na svijetu "IFA 2000", duljine 72 km, snage 2000 MW, nalazi se ispod La Manchea, duljine 72 km. Pri istosmjernom naponu 270 kV omogućuje golem 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, izostavljajući riječ proizvodnja (*production*) iz imena i od tada se naziva UCTE[67], Unija za koordinaciju prijenosa električne energije, i nema više među osnovnim zadaćama koordinaciju proizvodnje električne energije nego pružanje tehničke mogućnosti da se ta koordinacija provodi 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).

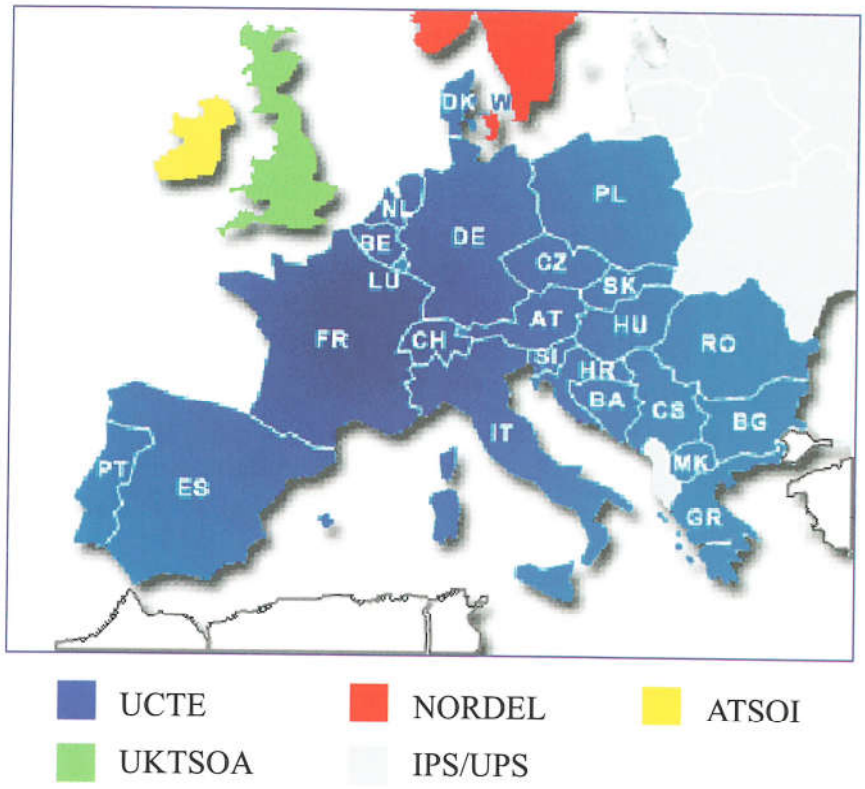
Rat na području bivše Jugoslavije, već 1991. godine razdvojio je – potpunim razaranjem TS 400/110 kV Ernestinovo, te djelomičnim razaranjim TS 400/220/110 kV Konjsko i kasnijim razaranjima na području Bosne i Hercegovine – interkonekciju UCPTE-a (odnosno, kasnije, UCTE) na dvije zone, svaku za sebe u 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, okončana 1999. go-

---

[65] CIS = Commonwealth of Independent States (engl.), Zajednica neovisnih država, obuhvaća: Armeniju, Azerbejdžan, Bjelorusuju, Gruziju, Kazahstan, Kirgistan, Moldaviju, Rusiju, Tadžikistan, Turkmenistan, Ukrajinu i Uzbekistan.

[66] O razlozima za to, vidi poglavlje 23.

[67] Union for Co-ordination of Transmission of Electricity



Slika 10.1. Europske elektroenergetske interkonekcije, 2005.

dine, jer je to alternativni spojni put Hrvatske prema prvoj zoni UCTE-a preko Mađarske; obje dotadašnje 400 kilovoltne veze bile su preko Slovenije (Zagreb–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-a 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[68] i jedna je od najvećih interkonekcija u sinkronom pogonu na svijetu. Instalirana snaga elektrana u toj interkonekciji je gotovo 600 gigavata (tisuća megavata), ukupna proizvodnja gotovo 2500 teravatsati, a opskrbljuje električnom energijom oko 450 milijuna ljudi (2004) (slika 10.1). Spojnih vodova 220 i 400 kilovolta, koji povezuju među sobom zemlje u interkonekciji UCTE u pogonu je oko 250!

Grčka se odlučila u međuvremenu 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, u pogonu od 2002. godine. Ukupna duljina ove veze, uključujući i nadzemne dijelove na oba kopna, je 273 kilometra. Najveća dubina polaganja kabela u more je oko 1000 metara.

Sjeverna Irska povezana je s mrežom Škotske, podmorskim kabelom istosmjerne struje prijenosne moći 500 MW, od 2002. godine.

---

[68] 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.

Širenje europskog interkonekcijskog obuhvata

Godine 1991. osnovan je poseban komitet MEDELEC[69] kojem je cilj elektroenergetsko povezivanje oko Mediterana. Izgrađena je veza koja proteže interkonekciju UCTE na sjeverno-afrički 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. Bospor je, inače, premošten s četiri voda pod naponom 400 kV.

Međukontinentalno povezivanje koje time nastaje, omogućilo bi europsko investiranje u korištenje primarnim 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.

U razmatranju je sinkrono povezivanje interkonekcije UCTE i interkonekcije IPS/UPS. Konačni izvještaj o mogućnostima takva povezivanja treba biti podnesen 2008. godine. Interkonekcija IPS/UPS[70] obuhvaća elektroenergetske sustave baltičkih zemalja (Latvije, Litve i Estonije) te Armenije, Azerbejdžana, Bjelorusije, Gruzije, Moldavije, 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 4000 MW i ukupne duljine 1800 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 zamišljan europski projekt je podmorski kabel Island–Njemačka, koji *sondira* Hamburg radi osiguranja električne energije iz hidroelektrana i geotermalnih izvora 1800 kilometara udaljenog Islanda na Atlantiku. Hidropotencijal i geotermički potencijal Islanda procijenjuje 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.

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

---

[69] Mediterranean Liaison Committee of Associations of Electricity Supply Undertakings

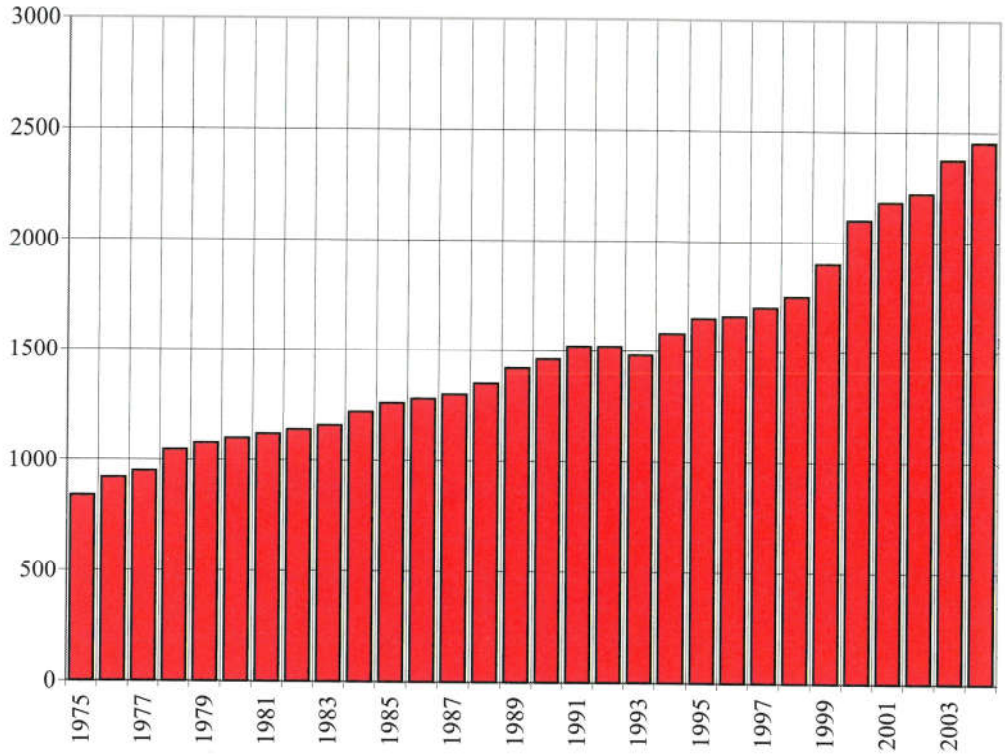
[70] IPS/UPS = Interconnected Power Systems/Unified Power System

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 odgovarajuć regulacijski nalog za smanjenje ili povećanje angažmana elektrana.

Terminološki, unutar Europe, već dulje vrijeme više se ne govori o elektroenergetskom sustavu pojedine zemlje, nego se pod elektroenergetskim sustavom podrazumijeva cjelokupna interkonekcija u sinkronom pogonu, a (pod)sustavi pojedine zemlje nazivaju se *regulacijskim područjima*[71]. Regulacijska područja omeđena su mjerilima 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*[72] u odnosu na vozni red. Taj se automatski postupak naziva *sekundarna regulacija.*[73]

Današnje stanje interkonekcija UCTE i NORDEL

Današnje 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



Izvor: UCTE-Memo 2004

Slika 10.2. Netoproizvodnja električne energije u UCTE (TWh)

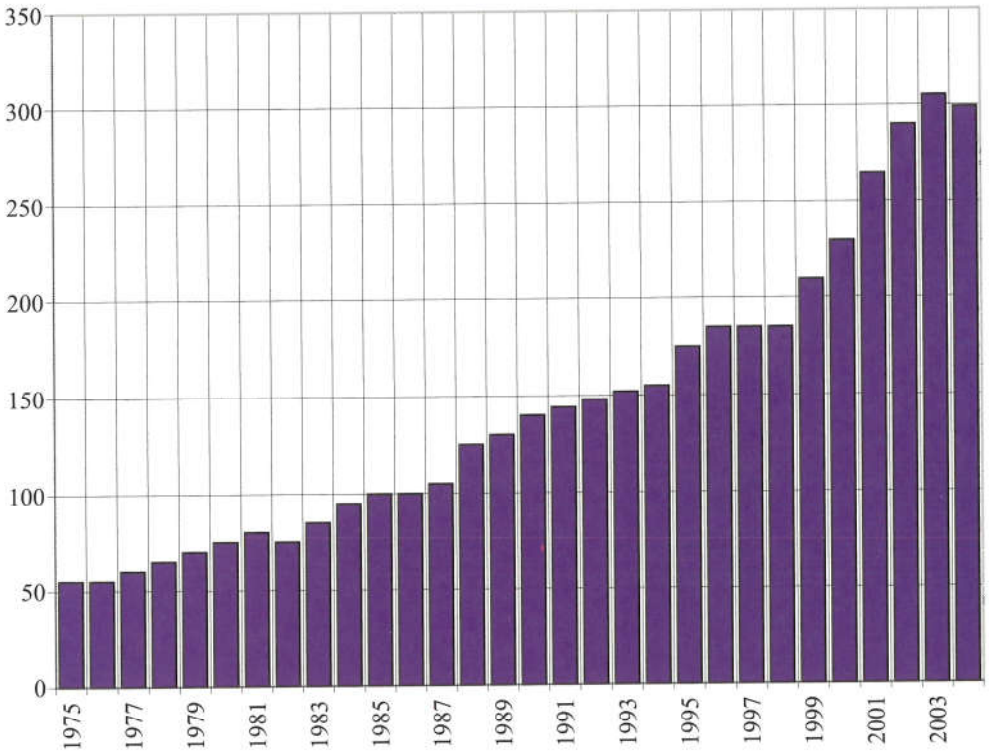
[71] control area (engl.), Regelzone (njem.)
[72] power flow (engl.), Lastfluß (njem.)
[73] secondary control (engl.), Sekundärregelung (njem.)

Tablica 1. Interkonekcija UCTE u 2004. godini

Zemlja	Snaga HE (MW)	Snaga NE (MW)	Snaga konv. TE (MW)	Snaga el.na ost. obn.izvore (MW)	Ukupna snaga (MW)	Proizvodnja HE (TWh)	Proizvodnja NE (TWh)	Proizv.konv. TE (TWh)	Proizvodnja uk. (TWh)	Potrošnja (TWh)	Vršno opteref. (MW)	Uvoz (GWh)	Izvoz (GWh)	Snaga elektrana/ Vršno opterećenje	Proizvodnja HE/ Ukupna proizvod.	Trajanje vršnog opt. (sati/god)
Belgija	1493	5802	8081	366	15752	1,6	44,9	34,9	81,4	87,5	13325	14612	6804	1,18	0,02	6567
Njemačka	9000	20500	68100	17300	114900	22,9	157,1	349,3	529,3	513,0	72000	44214	51519	1,60	0,04	7125
Španjolska	18014	7876	32855	7361	66106	33,3	60,9	147,9	242,1	234,5	37196	8182	10717	1,78	0,14	6304
Francuska	25394	63363	26908	10056	116721	64,5	428,8	55,4	546,7	477,2	79981	5995	66382	1,46	0,12	5966
Grčka	3080	0	7212	380	10852	4,9	0,0	44,2	48,2	51,2	8122	4862	2043	1,34	0,10	6304
Italija	20770	0	57000	1688	79468	47,9	0,0	238,4	286,3	321,5	53093	46265	752	1,50	0,17	6055
Slovenija	862	670	1262	0	2794	3,6	5,2	4,6	13,5	12,7	1930	7442	8199	1,45	0,27	6580
Hrvatska	2071	0	1670	5	3746	7,0	0,0	5,4	12,4	16,0	2692	10054	6357	1,39	0,56	5944
Bos. i Herc.	2064	0	1957	0	4021	6,0	0,0	6,6	12,6	10,5	1803	1650	3598	2,23	0,48	5824
Makedonija	503	0	907	0	1410	1,5	0,0	4,7	6,2	7,4	1358	2009	833	1,04	0,24	5449
Srbija i CG	3497	0	6400	0	9897	13,4	0,0	25,3	38,7	39,9	6867	6060	4030	1,44	0,35	5810
Luksemburg	1128	0	477	60	1665	0,9	0,0	3,1	4,0	6,3	877	6500	3133	1,90	0,23	7184
Nizozemska	37	440	18770	1406	21152	0,0	3,6	91,0	94,6	110,8	15128	21410	5191	1,40	0,00	7324
Austrija	11700	0	5900	670	18270	34,3	0,0	22,1	56,4	56,6	8894	16453	12994	2,05	0,61	6364
Portugal	4717	0	6178	825	11720	10,7	0,0	28,7	39,4	45,5	7840	8523	2130	1,49	0,27	5804
Švicarska	13295	3220	305	290	17335	35,1	25,4	3,0	63,5	60,1	9548	26083	25314	1,82	0,55	6295
Češka	2138	3537	10591	20	16286	2,5	24,8	50,6	77,9	61,1	10097	9770	25489	1,61	0,03	6051
Mađarska	46	1755	5685	100	8276	0,2	11,2	19,4	30,8	38,2	6357	13791	6321	1,30	0,01	6009
Poljska	2193	0	29350	145	31866	3,5	0,0	138,3	141,8	130,3	20937	5312	14603	1,52	0,02	6223
Slovačka	2429	2640	2290	3	8058	4,0	15,7	8,6	28,3	26,3	4323	8733	10592	1,86	0,14	6084
Rumunjska	6007	655	10081	0	16743	16,3	5,1	30,5	51,9	50,7	8028	1748	2941	2,09	0,31	6315
Bugarska	2930	2880	6420	0	12230	3,3	16,6	21,2	41,1	35,0	5949	741	6623	2,06	0,08	5883
UCTE	**133348**	**113347**	**308409**	**31765**	**588880**	**317,3**	**797,4**	**1333,4**	**2448,1**	**2392,9**	**370176**	**270409**	**276565**	**1,59**	**0,13**	**6464**
Zbroj vrš.opt.											376345					
Zap.Danska	11	0	5098	2379	7488	0,1	0,0	24,2	24,3	20,9	3517	5044	8463	2.13	0,00	5943
Zap.Ukrajina	27	0	2347	0	2374	0,1	0,0	7,6	7,7	4,4	975	1602	5772	2.43	0,01	4513

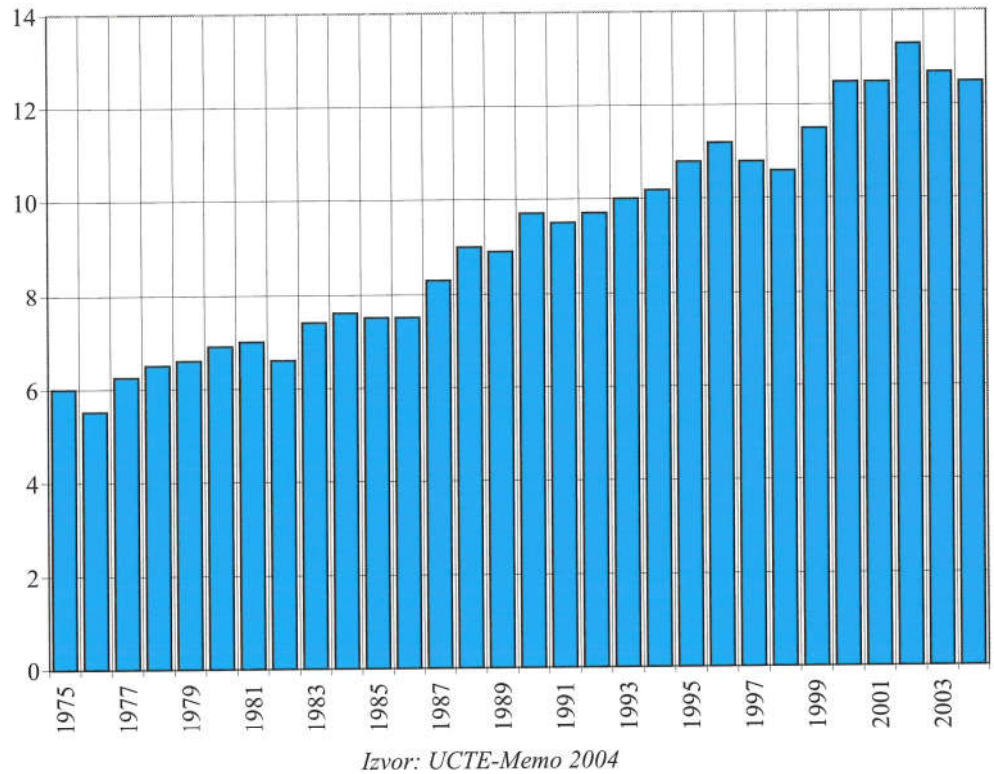
Tablica 2. Interkonekcija NORDEL u 2004. godini

Država	Snaga HE (MW)	Snaga NE (MW)	Snaga konv.TE (MW)	Snaga elektrana na ostale obn. izvore (MW)	Ukupna snaga elektrana (MW)	Prizvodnja HE (GWh)	Proizvodnja NE (GWh)	Prizvonja konv.TE (GWh)	Prizvodnja elektrana na ostale obn.izvore (GWh)	Ukupna proizvodnja (GWh)	Potrošnja (GWh)	Vršno opterećenje (MW)	Snaga elektrana/ Vršno opterećenje	Proizvodnja HE/ Ukupna proizvodnja	Trajanje vršnog opt. (sati/god)
Danska	11	0	8888	3811	12710	26	0	29050	9301	38377	35502	6246	2,03	0,00	5684
Finska	2986	2671	8423	2408	16488	14726	21779	34173	11242	81920	86917	13570	1,22	0,18	6405
Island	1156	0	117	202	1475	7132	0	5	1484	8621	8621	1033	1,43	0,83	8346
Norveška	27925	0	121	281	28327	109280	0	582	683	110545	122040	20675	1,37	0,99	5903
Švedska	16137	9471	5803	2140	33551	59529	75039	5284	8632	148484	146446	27300	1,23	0,40	5364
Ukupno	**48215**	**12142**	**23352**	**8842**	**92551**	**190693**	**96818**	**69094**	**31342**	**387947**	**399526**	**66800**	**1,39**	**0,49**	**5981**
Zbroj vrš.opt.												68824			



Izvor: UCTE-Memo 2004

Slika 10.3. Razmjena električne energije u UCTE (TWh)



Izvor: UCTE-Memo 2004

Slika 10.4. Udio razmjene u potrošnji električne energije u UCTE (%)

potražnje u interkonekciji je omjer ukupne godišnje potrošnje i vršnog opterećenja, tzv. trajanje vršnog opterećenja. Ono za cijelu interkonekciju iznosi u 2004. godini 6464 sati. U tolikom bi se trajanju plasirala sva stvarno utrošena energija uz nepromjenjeno opterećenje, jednako vršnom opterećenju. Inače, puna godina traje 8760 sati. Glavni podaci pojedinih zemalja-članica u 2004. godini izneseni su u tablici 1.

Najbitniji podatak koji se odatle može iščitati jest taj da se vršno opterećenje interkonkcije UCTE razlikuje za više od 6000 MW od zbroja vršnih opterećenja pojedinih zemalja, članica interkonekcije. Dakle, toliko bi elektrana bilo potrebno izgraditi, raspoređeno po svim sustavima da nema interkonekcije! Uočljivo je iz dijagrama da je u posljednjih 30 godina proizvodnja u interkonekciji UCTE porasla približno 3 puta a razmjena je porasla 5,5 puta (slike 10.2 i 10.3). Udio razmjene u ukupnoj proizvodnji električne energije povećao se s 6 posto u 1975. godini, na više od 12 posto u 2004. godini (slika 10.4). Znatno 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*[74] postojećih prijenosnih puteva.

Francuska, primjerice, izvozi oko 12 posto svoje proizvodnje, a Italija uvozi oko 14 posto svojih potreba (2004). Švicarska, kao naglašeno tranzitna zemlja – zbog svojeg središnjeg položaja u Europi, ima podjednak uvoz i izvoz, na razini čak 40 posto svoje proizvodnje. Ukupna razmjena u UCTE-u u jednom smjeru, uvoznom ili izvoznom, tvori veličinu od 300 TWh (2004). Stvorena je u posljednje vrijeme, ali i prije posljednjeg vremena, u Europi, elektroenergetska *tržnica* koja se ostvaruje sve življim korištenjem prijenosnom mrežom (slika 10.5).

Za interkonekciju NORDEL iznose se takvi podaci u tablici 2. Ovdje je *dobitak* od interkonekcije nešto veći od 2000 MW, za toliko bi se morala povećati ukupna instalacija elektrana u pojedinim zemljama da nema interkonekcije NORDEL. Omjer ukupne instalirane snage elektrana i vršnog opterećenja je 1,39 za cijelu interkonkciju NORDEL, a trajanje vršnog opterećenja za tu interkonkciju iznosio je u 2004. godini 5981 sat.

[74] congestion (engl.)

Slika 10.5. Karta mreže UCTE (01. 07. 2005.)

11

Tržišna elektroprivreda

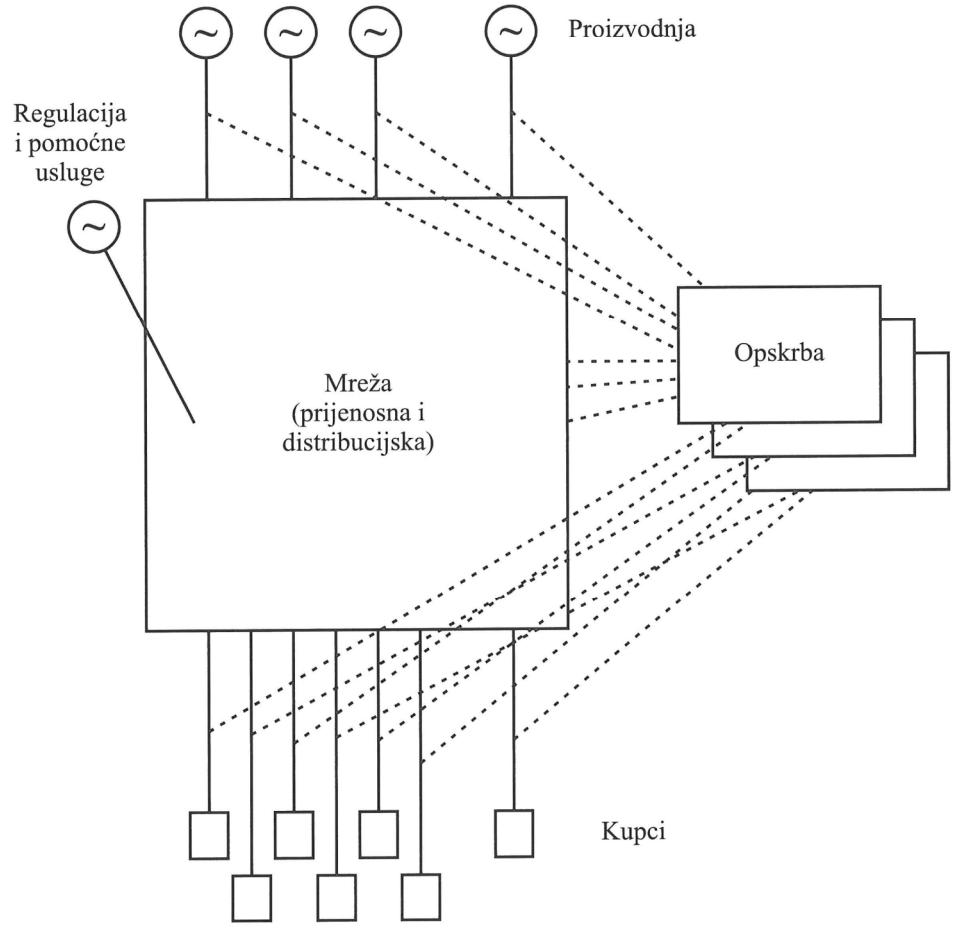
U svjetskim razmjerima, sukladno tome i u zemljama Europske Unije, sve oštrije formuliraju se zahtjevi ukupnog društvenog okruženja da se elektroprivredni proizvod nađe u konkurentskoj a ne monopolnoj situaciji na tržištu, poput drugih roba. S time u vezi, godine 1996. donesena je Direktiva EU 96/92 o internom tržištu električne energije, a njezina zamjena novom Direktivom EU 2003/54 donesena je 2003. godine.

Takvo preoblikovanje javne elektropriverde počelo je prije dvadesetak godina, pod različitim nazivima: liberalizacija, deregulacija, demonopolizacija, restrukturiranje, uvođenje tržišta u elektroprivredu. Doista, do tada, elektroprivreda je bila ekskluzivno monopolizirana. Svojstva električne energije: njezina neuskladištivost, javna posvemašnja dosežnost a kapitalintenzivnost, vodila su tome da su izrasle velike nacionalne kompanije koje su se ekskluzivno i nedovoljno razvidno prema javnosti bavile elektroprivrednim poslom i – s vremenom – razvijale se *komotno* i donekle relativno rastrošno, ne vodeći dovoljno brige i obzira prema svojim kupcima, koliko su to sve izbirljiviji kupci očekivali. Cijena električne energije je bivala sve manja u odnosu na nadnicu kupaca[75] a ostavljala je ipak dovoljno prostora za stanovite neracionalnosti i pretjerivanja. Recimo, gradile su se elektrane po principu *idemo je graditi – svakako će trebati.* Uz stalni rast potražnje, tako se i ostvarivalo – međutim ne uvijek na najracionalniji i najštedljiviji način. Državna vodstva, pod pritiskom javnosti, postaju sve zainteresiranija za uvođenje tržišnoga nadmetanja i u tom sektoru gospodarstva – ili barem dijelu tog sektora.

Mreže, prijenosnu i distribucijsku, nije moguće izložiti konkurenciji – nezamislivo je i ekonomski neodrživo da bi na jednom području bile izgrađene dvije ili više paralelnih mreža, kako bi kupci mogli birati iz koje će se opskrbljivati. Stoga mreže moraju ostati u reguliranom ekonomskom položaju. Dakle, po državi općim zakonom propisanom obvezom javne opskrbe u propisanim uvjetima i dobivanja opet po državi kontrolirane novčane naknade za izvršenje te obveze. Međutim, elektrane se mogu natjecati koja će biti više a koja manje angažirana za opskrbu kupaca pomoću tih mreža, a opskrbljivači se mogu natjecati u tome kako složiti najpovoljniju kombinaciju tih elektrana i ponuditi kupcima najzanimljiviji konačni proizvod (u pogledu cijene, kvalitetete, sigurnosti, i drugih – sve raznovrsnijih i čak, donekle, isforsiranih – svojstava), koristeći opet prijenosnu i distribucijsku mrežu za isporuku tog proizvoda, električne energije (slika 11.1). Tako je i uređeno spomenutim direktivama Europske Unije, zadržimo li se samo na europskim prilikama.

Ujedinjeno Kraljevstvo bilo je europska prethodnica tim direktivama, liberalizaciju uvelo je pet godina prije donošenja direktiva i time ostvarilo – ponajprije – intenzivnu izgradnju modernih plinskih elektrana, zahvaljujući *bogomdanim* otkrićima nafte i plina u Sjevernom moru, a izostavljajući iz pogona stare neekonomične elektrane na ugljen. Njemačka se najžešće i najotvorenije protivila liberalizaciji elektroprivrede (prema tezi: *rade već stotinu godina dobro – nemojmo ih dirati!*), Francuska je bila *i za i protiv* (*za*, stoga što će time

[75] Prosječni Nijemac morao je u 2002. godini za 200 kilovatsati električne energije raditi dvaipol radna sata. U 1991. godini prosječni Nijemac za istu količinu električne energije morao je raditi jedan radni sat dulje, dakle 3,5 radna sata. Protegne li se to unazad do 1960. godine, tada je Nijemac radio deset radnih sati za 200 kilovatsati električne energije. (Godine 1911. njemački je radnik morao raditi dva sata za 1 kilovatsat!)



Slika 11.1. Položaj opskrbe u tržišnoj elektroprivredi

postati još primamljivija prodaji svoje proizvodnje iz nuklearnih elektrana, *protiv* jer je isto zadovoljna svojim EDF-om[76], po mnogima najuzornijom velikom elektroprivrednom kompanijom na svijetu). Italija je bila *za* (jer je oslonjena na veliki uvoz električne energije, te joj je u interesu konkurencija među dobavljačima te energije). Za našu temu, najvažnije je to, da takva konkurencija međudržavnih razmjera otvara sve veća i veća očekivanja od prijenosnih mreža. Ostale zemlje, *kako-koja*, uglavnom državno-politički aparat bio je za neodgodivu liberalizaciju, a elektroprivrede su bile manje ili više rezervirane prema tom kretanju. No, kako je rečeno, direktivom EU-a iz 1966. godine uvedena je obveza uvođenja tržišta pomoću zakonodavstava svake zemlje-članice EU-a, a direktivom iz 2003. godine fiksirana je obveza da se tržišta moraju potpuno otvoriti, dakle da svaki kupac bez iznimke mora moći birati svog opskrbljivača do 1. srpnja 2007. godine.

Očekivanja su bila kako će cijena električne energije padati. To se počelo, u početnom razdoblju primjene direktive iz 1996. godine, u blagoj mjeri i ostvarivati. Elektroprivrede su gasile stare i neekonomične elektrane, otpuštale suvišne radnike (u Njemačkoj po desetak tisuća njih svake godine, sedam godina uzastopno), izdvajale neelektroprivredne djelatnosti, razdvajale se po vertikali (proizvodnja-prijenos-distribucija), udruživale po horizontali

[76] Electricité de France

(velike kompanije kupovale su manje po Europi), štedile i ekonomizirale na održavanju, a ponajviše se susprezale od izgradnje novih elektrana, naglašenije koristeći postojeće. Zapadnoeuropske zemlje povećavale su svoju dobavu iz istočnoeuropskih zemalja, koje su nakon *pada Berlinskog zida* najednom imale viškove jeftinije električne energije, jer se urušila njihova industrijska proizvodnja, te im je bilo stalo proizvoditi i izvoziti barem električnu energiju po – uvjetno govoreći – ma kojoj cijeni.

Doduše, točnije govoreći, nisu krajnje cijene za kupce u zapadnoeuropskim zemljama ostale posve imune na porast, ako se stvar promatra duž dovoljno duge vremenske crte. *Istopili* su se početni izvori redukcija cijene i nakon toga cijene sporo ali uporno – u pravilu – rastu. Ili barem raste udio od države propisanih opterećenja na cijenu, no za krajnjeg kupca stvari ostaju praktički jednake! Eventualno je došlo do blage preraspodjele: cijene za industriju postale su nešto niže (države svoju industriju nastoje održati što konkurentnijom) a cijene za kućanstvo postale su nešto više (jer to dostignuta primanja stanovništva dopuštaju). Gledajući dovoljno otvorenih očiju na proteklu desetgodišnju vremensku crtu, dogodilo se zapravo to da su sve elektroprivredne djelatnosti pod naglašenim nadzorom, da štede na svakom koraku, prvenstveno nedovoljnim investiranjem. To će se – u krajnjoj konzekvenci – odraziti na bitno smanjenje sigurnosti opskrbe i povećanje cijene električne energije, jer će nastupiti – za jedno pet do deset godina – njezina nestašica u europskim razmjerima! Elektroprivreda sve naglašenije funkcionira po principu *od-danas-do-sutra* a elektroprivreda je djelatnost u kojoj treba misliti *danas-za-prekosutra.*

Parcelacija proizvodnje, uz njezino komercijalno strogo odvajanje od mreže (sukladno direktivama), može voditi tome da elektrane s najnižom proizvodnom cijenom ugovaraju prodaju svoje proizvodnje po cijeni višoj od njihove proizvodne cijene, a svatko će ih angažirati jer su njihove ponude po cijeni ipak niže od prosječne. Elektrane kojima je proizvodna cijena jednaka prosječnoj, po takvoj cijeni će i ugovarati isporuku i niti će posebno zaraditi – niti biti u gubitku. Opskrbljivači će ih *hoćeš-nećeš* angažirati, jer je njihova ponuda po cijeni zapravo očekivana i najbrojnije su. Elektrane s najvišom proizvodnom cijenom orjentirat će se na pružanje pomoćnih usluga (sekundarna regulacija, pokriće energije uravnoteženja, spremnost da se starta iz hladnog stanja ili uz beznaponsko stanje na mjestu priključka, proizvodnja jalove energije i sl.), koje će odgovarajuće naplaćivati. Neće biti središnje *kase* proizvodnje, štoviše neće se niti znati koliko je proizvodnja ukupno ubrala sredstava, dapače to će biti poslovna tajna – ugovorena cijena proizvodnje. Suma izdataka za proizvodnju mogla bi biti veća no u predtržišnoj elektroprivredi, kada se proizvodnja koordinirala s jednog mjesta i vodilo računa o ukupnom optimumu. Osobito kada – u nedostatku dovoljne ponude – prema tržišnom zakonu ponuda-potražnja dođe do skokovitog povećanja ponuđenih cijena. Sigurnost opskrbe također bi se mogla smanjiti, jer će se više voditi računa o pojedinačnim transakcijama a manje o sustavu u cjelini, vodit će se pogon s povećanim rizikom.

Praktički, najizloženije pomnom, ponekad čak i neutemeljenom *stiskanju* svih troškova naći će se prijenosna i distribucijska mreža, jer je djelatnost prijenosa i distribucije regulirana (nadzirana, dakle, po državi ili od po državi uspostavljenog regulatora) te izložena neprestanoj pažnji i kritici javnosti. To se može odraziti na usporavanje nužne dogradnje tih mreža, prvenstveno prijenosnih, jer je za potrebu dogradnje ili rekonstrukcije distribucijske mreže lakše osigurati razumijevanje lokalne zajednice. Ta je mreža tu, neposredno oko nas, a prijenosna – tamo negdje; *koga-briga!*

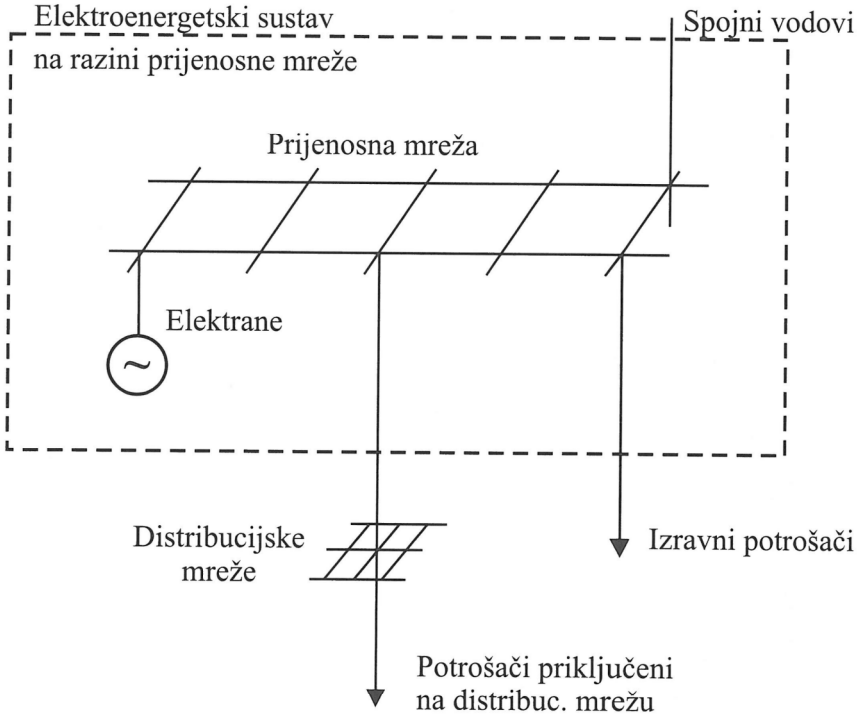
U primjeni je i Europska energetska povelja[77] koja bi trebala omogućiti slobodan pristup energetskim izvorima, ponajprije na prostranstvima koja su istočno od europskog ruba i slobodan pristup modernim tehnologijama, koje su zanimljivije što su zapadnije od istog tog ruba. Uspostavljena, time, međuovisnost bi trebala na obje strane osigurati prihvatljiv rizik u dugoročnim energetskim orijetacijama. Zbivanja s ruskim plinom u zimi 2005/2006. godine, kada je došlo do jednostranog prigušenja isporuke na zapad Europe, ne obećavaju pridržavanje Povelje bez poteškoća.

77 Europsku energetsku povelju zaključile su 16/17. prosinca 1994. godine u Lisabonu: Albanija, Armenija, Australija, Azerbejdžan, Belgija, Bjelorusija, Bugarska, Kanada, Hrvatska, Cipar, Češka Republika, Danska, Estonija, Europska Unija, Finska, Francuska, Gruzija, Njemačka, Grčka, Mađarska, Island, Irska, Italija, Japan, Kazahstan, Kirgistan, Latvija, Lihtenštajn, Litva, Luksemburg, Malta, Moldavija, Nizozemska, Norveška, Poljska, Portugal, Rumunjska, Ruska Federacija, Slovačka, Slovenija, Španjolska, Švedska, Švicarska, Tadžikistan, Turska, Turkmenistan, Ukrajina, Ujedinjeno Kraljevstvo, Sjedinjene Američke Države i Uzbekistan. Hrvatski Sabor ratificirao je Povelju u rujnu 1997. godine.

12

Suvremeni pogled na prijenos električne energije

Elektrane i prijenosna mreža na koju su one povezane, tvore elektroenergetski sustav u najužem poimanju. Uže poimanje od toga nije smisleno, prijenosna mreža bez elektrana dakako je *mrtva* – a elektrane nepovezane s prijenosnom mrežom nemaju kamo plasirati proizvedenu energiju, niti mogu garantirati ikakvu sigurnost opskrbe. Prema takvom pristupu, na elektroenergetski sustav priključeni su korisnici sustava: potrošači neposredno priključeni na prijenosnu mrežu (izravni potrošači) i distribucijske mreže koje razvode električnu energiju do potrošača priključenih na distribucijsku mrežu. Razumijeva se ograničenje na neko zemljopisno područje, najčešće državno. U uobičajenim europskim okolnostima, susjedne prijenosne mreže povezane su spojnim vodovima. Šire poimanje elektroenergetskog sustava, obuhvaća i distribucijske mreže[78]. Korisnici tako shvaćenog elektroenergetskog sustava su samo potrošači.



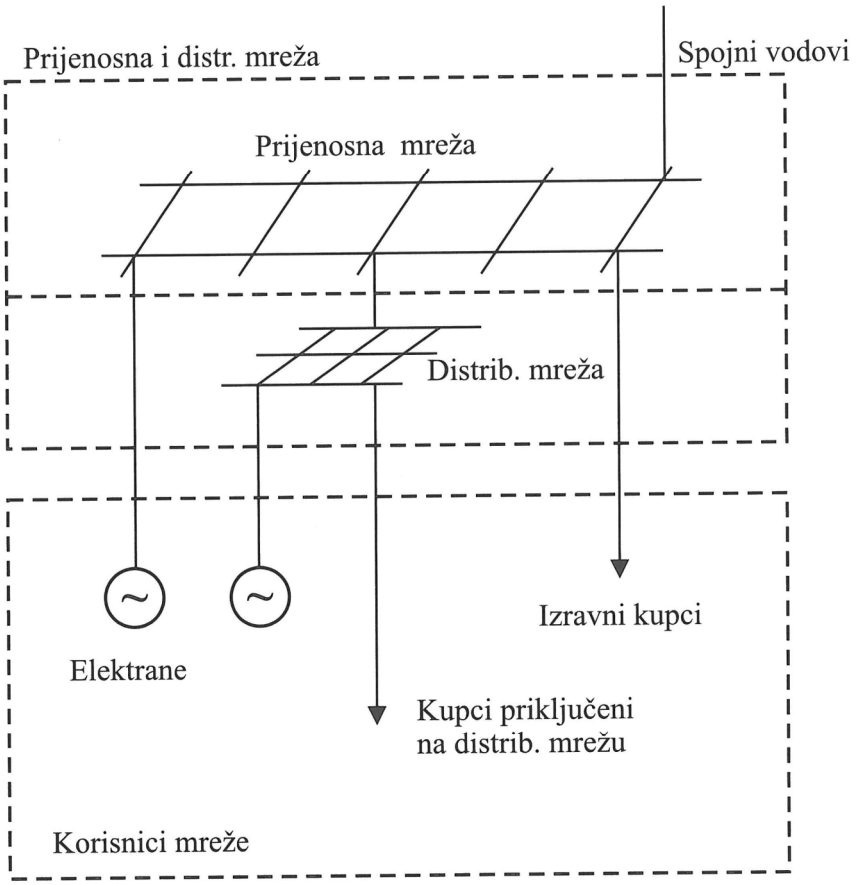
Slika 12.1. Predtržišna elektroprivreda

[78] U najširem poimanju, elektroenergetskim sustavom obuhvaćena su i trošila, dakle sustav – fizikalno i sveukupno promatrano – obuhvaća: elektrane, prijenosnu i distribucijsku mrežu te trošila. Ako se razmatra samo elektroprivredni dio sustava izostavljaju se trošila, ona predstavljaju potrošački dio sustava. Trošila su uređaji u kojima se električni oblik enegije pretvara u korisni oblik energije (svjetlo, toplinu, mehanički i kemijski oblik), dakle žarulje, električne peći, elektromotori, elektrolitske kade i svi bezbrojni drugi električni uređaji. Egzaktno razmatranje prilika u sustavu traži i obuhvat karakteristika trošila u sustavu.

Dispečerska služba, najčešće na državnoj razini, vodi pogon elektroenergetskog sustava, usklađujući tekuću potražnju za električnom energijom s mogućnostima proizvodnje na vlastitom području i dobave iz drugih područja, udovoljavajući pritom zahtjevima sigurnosti, kvalitete i što niže cijene energije isporučene potrošačima. Očekivana svojstva električne energije (sigurnost, kvaliteta, cijena), dispečeri osiguravaju kooperativnim angažmanom raspoloživih elektrana i ponuđene dobave, kakav angažman omogućuje raspoloživa prijenosna mreža. Tako je bilo u predtržišnoj elektroprivredi (slika 12.1).

Prijenosna mreža, svojevrsna *pozornica*

Prema novom europskom/svjetskom gledanju na tržišno orjentiranu elektroprivredu, mreža je *pozornica* na kojoj se razdvojeno trebaju pratiti energetsko-tehnički i energetsko-komercijalni procesi[79]. Svi ostali sudionici elektroenergetskog procesa postaju *korisnici mreže*[80] (samo prijenosne mreže ili prijenosne i distribucijske mreže): elektrane, izravni kupci priključeni na prijenosnu mrežu i kupci priključeni na distribucijsku mrežu (slika



Slika 12.2. Tržišna elektroprivreda

[79] Sva gledanja u nastavku, iznesena su sukladno Direktivi EU 2003/54 o električnoj energiji, donesenoj 2003. godine.

[80] system user (engl.), Netznutzer (njem.)

12.2). *Elektroenergetski sustav postaje mreža plus korisnici mreže.* Operatori mreža omogućuju ravnopravan pristup prijenosnoj i distribucijskoj mreži svim njihovim korisnicima. Elektrane nude svoj proizvod, natječući se cijenom na tržištu električne energije. Kupci električne energije izabiru opskrbljivača[81], koji za dobavu električne energije koristi prijenosnu mrežu (za dobavu izravnim kupcima) ili, uz prijenosnu, i distribucijsku mrežu (ako su kupci priključeni na distribucijsku mrežu). Operatori prijenosne i distribucijske mreže utvrđuju tehničku izvodljivost kupoprodajnih aranžmana, utvrđuju dakle može li planiran protok energije može biti ostvaren raspoloživim vodovima, i – ako je to ispunjeno – daju pristanak na takve aranžmane.

Susjedne prijenosne mreže povezuju spojni vodovi, koji omogućuju razmjenu energije među takvim mrežama ili tranzit jednom mrežom za potrebe korisnikâ izvan te mreže.

Energetsko-tehničko upravljanje u tako nastalom pravnom ustrojstvu, dakle vođenje pogona prijenosne mreže, na nju priključenih elektrana, distribucijskih mreža i kupaca električne energije – vođenje elektroenergetskog sustava, prema konvencionalnom a i nezaobilaznom tehnološkom poimanju u tržišnoj elektroprivredi, stavljeno je u nadležnost – u pravilu – vlasnika prijenosne mreže, koji se naziva *operator prijenosnog sustava*[82].

U nekim elektroprivredama (primjerice: Hrvatska) je organizacijska strana energetskih transakcija stavljena u nadzor *operatoru tržišta*[83], koji se treba brinuti o organizaciji tržišta električne energije na način osigura potpuno razvidnu konkurenciju, kako bi to rezultiralo novčano najpovoljnijim i nediskriminantnim komercijalnim uvjetima za kupce i dobavljače električne energije. Naravno, bilo kakvi komercijalni aranžmani postaju izvršni ako ih potvrdi operator prijenosnog sustava; on vodi računa o mrežnim ograničenjima, kao i ispunjenjima nužnih sustavnih okolnosti pri tome – regulaciji frekvencije, regulaciji napona, te očuvanju sigurnosnog kriterija, kao najbitnijim. Isto vrijedi i pri formuliranju elektroenergetske bilance za kraće ili dulje razdoblje: tehničko-tehnološka ograničenja i okolnosti ispred su komercijalnih interesa.

Ako su elektrane i prijenosna mreža i distribucijska mreža u istom vertikalno udruženom poduzeću, računovodstveno praćenje i rukovođenje mora biti odvojeno, što treba omogućiti neovisnost i javni uvid u novčanu stranu njihova poslovanja. Vlasnik prijenosne mreže dobiva, od države odnosno državnog regulatora potvrđenu, *naknadu za korištenje prijenosnom mrežom*[84] koja pokriva pogon i održavanje mreže, gubitke u mreži, angažiranje elektrana za regulacijske, potporne i rezervne potrebe, te sredstva za razvoj prijenosne

---

[81] Tako je u potpuno otvorenom tržištu. U prijelaznom razdoblju, dok tržište nije potpuno otvoreno, razlikujemo kupce koji mogu birati svog opskrbljivača – time i komercijalne uvjete dobave, to su povlašteni kupci (eligible customer, engl.) i one koji to ne mogu, to su tarifni kupci – koji plaćaju dobavu po propisanom tarifnom sustavu (tariff customer, engl.). Obično je godišnja potrošnja električne energije propisana mjera koja u tom prijelaznom razdoblju razlikuje kupce.

[82] TSO = Transmission System Operator (engl.), ÜBN = Übertragungsnetzbetreiber (njem.). Naziv *operator prijenosnog sustava* primjenjen je u Hrvatskoj stoga što je u nadležnosti tog operatora – povrh razvoja, pogona i održavanja prijenosne mreže te tokova snaga u toj mreži i u spojnih vodova prema drugim mrežama – i pogon svih elektrana priključenih na tu mrežu, dakle vođenje elektroenergetskog (pod)sustava na razini prijenosne mreže. Stoga takav naziv bolje opisuje njegove funkcije od eventualnoga naziva *operator prijenosne mreže,* kako ga zovu Nijemci (Übertragungsnetzbetreiber).

[83] MO = Market Operator (engl.), Marktbetreiber (njem.)

[84] transmission charge, transmission fee (engl.), Übertragungsnetznutzungsentgelt (njem.)

mreže odobren od države. To je sustav *reguliranog*[85] *pristupa mreži*. Elektrane dobivaju naknadu za isporučenu energiju po cijeni kakvu su postigle na tržištu (to im plaćaju kupci) i naknadu za pomoćne usluge koje su eventualno pružale operatoru prijenosnog sustava (tu im naknadu plaća taj operator). Kupci plaćaju kupljenu električnu energiju, naknadu za korištenje prijenosnom mrežom i naknadu za korištenje distribucijskom mrežom (ako su priključeni na tu mrežu).

Opskrbljivač[86] električnom energijom je novi sudionik na elektroprivrednom tržištu. On dobavlja električnu energiju gdje stigne, nudi je kupcima kako zna, i oni kupuju od njega ili od drugoga opskrbljivača. Novčano funkcionira tako da plati naknadu za korištenje distribucijskom mrežom, naknadu za korištenje prijenosnom mrežom i cijenu dobavljene električne energije elektrani ili elektranama, koje ubire od kupaca, te ostvari stanovitu zaradu. Ako je on unutar tradicionalnog distribucijskog poduzeća, mora se računovodstveno i upravno izdvojiti.

Odmah se javlja pitanje: kako kupac zna da je kupio baš energiju od elektrane ili elektrana za koje opskrbljivač tvrdi da je dio iz njihove proizvodnje prodao tom kupcu?

Elektroenergetski sustav zamislimo nadomještenim svojevrsnim spremnikom u koji *sve* elektrane pumpaju energiju i iz kojega istodobno *svi* kupci preuzimaju energiju. Pri tome sva energija čim uđe u rezervoar neobilježena je svojim podrijetlom, *neobojena* je. Kupci ne znaju, niti mogu znati, čiju energiju fizikalno preuzimaju. Jedina je i potpuna fizikalna istina: svi kupci zajedno, preuzimaju energiju od svih elektrana zajedno, u svakom trenutku.

Potrebno je još naglasiti: taj rezervoar je zapravo svakog trenutka posve prazan! Koliko energije doteče u nj – toliko energije istodobno otječe iz njega. Ako bi bilo nešto energije u njemu, elektrane bi *pobjegle*, frekvencija bi porasla iznad 50 herca. Ako bi ponestalo energije u njemu, elektrane bi *posustale*, frekvencija bi pala ispod 50 herca. Fina regulacija u elektroenergetskom sustavu brine sekundno o potrebnoj ravnoteži i daje nalog regulacijskim elektranama u sustavu da usklade svoju proizvodnju s trenutnom potražnjom, koja je – praktički – svake nove sekunde drukčija.

Ulogu spremnika u elektroenergetskom sustavu igra prijenosna mreža. Opskrbljivač našeg kupca ugovara isporuku energije s određenom elektranom, ta elektrana *tiska* toliku proizvodnju u mrežu, primjerice u Belgiji, a kupac toliku energiju povlači iz mreže, primjerice u Njemačkoj. Operatori prijenosnih sustava kontroliraju na mjestu napajanja (u Belgiji) i mjestu oduzimanja (u Njemačkoj) da li je riječ o jednakoj snazi svakog trenutka. Pri tome kupcu dotječe energija iz cjelokupnog sustava, a ne obojena energija iz *njegove* elektrane, kao što se i proizvodnja njegove elektrane *razlijeva* po cjelokupnom sustavu. Dakako, načelno, ovdje kupca ne treba zamišljati pojedinačno, nego kao skupinu svih kupaca koje opskrbljuje jedan opskrbljivač. I elektranu nije nužno zamišljati pojedinačno, čak ju je moguće zamišljati kao skupinu elektrana s formuliranom ponudom na burzi električne energije, iz koje ponude opskrbljivač ugovara energiju za svoje kupce.

---

[85] *Regulirani* pristup mreži (*Regulated Third Party Access, Regulated TPA,* engl.), znači ne dogovarani ili ugovarani (*Negotiated TPA,* engl.) sa svakim korisnikom mreže na svoj način, nego se svakom korisniku mreže pružaju jednaki tehnički i komercijalni uvjeti tog pristupa, kontolirani od države, odnosno državnog regulatora, dakle uz potpunu razvidnost i onemogućenu diskriminaciju ili favorizaciju. Time je ujedno načinjena i distinkcija među djelatnostima: regulirane djelatnosti su suprotne tržišnim djelatnostima, koje se ponašaju slobodno, konkurentski i – u krajnjem slučaju – s pravom da nekoga favoriziraju a nekoga diskriminiraju, prema svojim diskrecionim poslovnim mjerilima.

[86] supplier (engl.), Lieferer (njem.)

Natječaj za izgradnju nove potrebne elektrane (koju potrebu pravodobno signalizira operator prijenosnog sustava), raspisuje nadležno državno tijelo i nju gradi onaj tko dobije posao na tom natječaju, primjenjuje li se sustav *natječajnog izbora novih elektrana*[87] (to je zakonom *iznimno* dopušteno u Hrvatskoj). Ako se primjenjuje *sustav odobrenja za izgradnju novih elektrana*[88] (kao što je to redovit zakonom propisan slučaj u Hrvatskoj), tada se zapravo prepušta samim potencijalnim investitorima takve izgradnje da se jave kad god hoće nadležnom državnom tijelu i to tijelo izdaje odobrenje za izgradnju ako su ispunjeni zakonom propisani uvjeti. Najčešće, sve se elektrane – i nove i zatečene – razvrstavaju prema povlaštenosti. *Povlaštene*[89] su one elektrane koje na gospodarski i ekološki primjeren način koriste obnovljive izvore energije ili proizvode električnu i toplinsku energiju u spojenom procesu, te ih se angažira prije svih drugih elektrana, praktički nisu podvrgnute djelovanju tržišta, a dodatnu naknadu za takvo netržišno angažiranje plaćaju najčešće svi kupci električne energije solidarno, jer je angažiranje takvih elektrana korisno za društvo u cjelini.

Operator prijenosnog sustava

Operator prijenosnog sustava zadužen je za razvoj, izgradnju, pogon i održavanje svoje prijenosne mreže, te za tekuće, kratkoročno i dugoročno skladno funkcioniranje elektrana, distribucijskih mreža i izravnih kupaca priključenih na tu mrežu, a osobito za:

– pružanje usluga sustava (održavanje frekvencije, održavanje napona, ponovna uspostava opskrbe, vođenje elektroenergetskog sustava);

– nadoknadu gubitaka u prijenosnoj mreži;

– osiguravanje energije uravnoteženja između tekuće potražnje i tekuće proizvodnje;

– kratkoročnu i dugoročnu prevenciju zagušenja u prijenosnoj mreži i spojnim vodovima prema susjednim mrežama;

– osiguranje prekograničnog prijenosa.

Važan dokument, koji se pojavljuje u svim zemljama, nakon prelaska elektroprivrede na tržišni način poslovanja, su tzv. *mrežna pravila*[90]. Mrežna pravila sadrže skup odredbi kojih se trebaju pridržavati svi vlasnici mreže i korisnici mreže (korisnici mreže: proizvođači energije – elektrane, i kupci) u elektroenergetskom sustavu radi ujednačenog pristupa pri korištenju, održavanju i razvoju mreže. Za uređenje komercijalne strane svih odnosa između korisnika mreže i operatora propisuju se *tržišna pravila*[91].

Za pružanje *usluga sustava*[92] korisnicima mreže, operator prijenosne mreže angažira elektrane ili kupce sposobne za davanje takvih usluga, koje se zovu *pomoćne usluge*[93] kada se pružaju operatoru. To mogu biti regulacijske elektrane, za koje se izdaju regulacijski nalozi sa središnjeg mjesta vođenja sustava a koje svojim trenutnim povećanjem ili smanjenjem angažmana odražavaju dogovoreni vozni red razmjene električne energije sa susjednim regulacijskim područjima. Mogu biti elektrane ili kupci koji posjeduju kompenzacijske mogućnosti, pa su kadre sudjelovati u regulaciji napona, proizvodnjom ili potrošnjom jalove energije. Mogu bi-

[87] tendering (engl.), natječaj za izbor elektrana koje mogu pristupiti mreži

[88] autorization (engl.), odobrenje elektrani za pristup mreži

[89] qualified producer (engl.), povlašteni (kvalificirani) proizvođač

[90] Grid Code (engl.)

[91] Market Code (engl.)

[92] system services (engl.)

[93] ancillary services (engl.), Hilfsdienste, Vorleistungen (njem.)

ti elektrane spremne za *crni start* ili spremne za pogon na vlastitu potrošnju ili za otočni pogon, koje u trenucima raspada elektroenergetskog sustava mogu učinkovito pomoći oko njegova ponovnog uspostavljanja. Vođenje sustava, dakle prijenosne mreže i na nju priključenih elektrana, objedinjuje funkcije planiranja, upravljanja i nadzora nad elektroenergetskim sustavom.

Pri prijenosu električne energije, vodovi i transformatori prijenosne mreže pod naponom su i njima teku struje, što je razlog *fizikalno neizbježnim gubicima* električne energije u tim jedinicama prijenosne mreže. Pri tome, znatno su veći, čak presudni, gubici koji nastaju radi toka struje vodičima u mreži, dakle vodičima vodova i vodičima u namotima transformatora. A ti su ovisni o kvadratu struje koja njima teče te o djelatnom otporu tih vodiča. Kako je djelatni otpor svih vodova u mreži prilikom jedne konfiguracije mreže stalan, izlazi da su gubici u toj mreži ovisni o kvadratu opterećenja pojedinih jedinica mreže, koje je ovisno o tekućoj potražnji i o naponu na pojedinim dijelovima mreže, jer napon određuje kolika će teći struja. Dakle, operator prijenosne mreže ima mogućnosti, da – izborom najprikladnije konfiguracije mreže za tekuću potražnju i uz traženu sigurnost mreže te djelovanjem na naponske prilike u pojedinim čvorištima mreže – djeluje na tekuće ostvarivanje manjih ili većih gubitaka. U predtržišnoj elektroprivredi, gubitke su namirivale angažirane elektrane, uvjetno kažimo: *usput*, uz proizvodnju energije za potrošače. U tržišnoj elektroprivredi, kupci kupuju energiju na svome brojilu i – opet uvjetno rečeno – *nije ih briga* koliki su i tko namiruje gubitke u mreži pri tome. Ostaje operator prijenosnog sustava da, brinući da ti gubici budu razumni, osigura njihovo pokriće angažiranjem elektrane/elektrana u tu svrhu.

Također, operator prijenosnog sustava mora osigurati *energiju uravnoteženja* za pokriće razlike između ugovorene i stvarno predane energije iz mreže odnosno preuzete energije u mrežu, u pojedinom tekućem satu. U predtržišnoj elektroprivredi i ta je energija bila anonimno ostvarena, u tržišnoj elektroprivredi svaki veći kupac ili skupina malih kupaca, ugovara putem svog opskrbljivača satni raspored povlačenja energije. Isto tako, opskrbljivač ugovara satni raspored dobave te energije i sve se to prijavljuje operatoru prijenosnog sustava. Taj brine o skladu dobave i potražnje i ako je taj sklad poremećen u bilo kojem smjeru, mora moći angažirati ili dezangažirati elektrane spremne za takvo korištenje, inače sustav ne bi mogao funkcionirati. Dakako, elektrane angažirane u takvu režimu, skuplje će zaračunavati svoju uslugu, te mora biti znan *krivac* za njihovo angažiranje i taj mora snositi (novčane) posljedice svojega ponašanja. No, svakako, mora se urediti i stanovita tolerancija, koja pri tome ide na račun operatora prijenosnog sustava.

Vrlo dinamični aranžmani prijenosne mreže od pojedinih opskrbljivača, vodit će ne baš uvijek optimalnom rasporedu angažirane proizvodnje električne energije. Javljat će se kretanja prema preopterećenju ili podopterećenju jedinica prijenosne mreže i operator prijenosnog sustava morat će za sve sate dana unaprijed sagledavati očekivanu sigurnost mreže i na tome zasnivati svoj pristanak na namjeravane transakcije u kupoprodaji električne energije. Brinut će se o očuvanju tzv. *kriterija (n–1)* pri tome, prema kojem kriteriju mreža mora ostati bez preopterećenja svih svojih jedinica, dakle u normalnom pogonskom stanju, nakon ispada jedne – bilo koje – raspoložive jedinice mreže. Račun je složen, jer treba voditi računa o Kirchhoffovim zakonima prema kojima se fizikalno nezaobilazno ravnaju tokovi snaga u mreži. Bilo koja promjena u bilo kojem čvorištu ili grani u mreži, vodi promjenama u svim granama mreže! Ako, primjerice, treba povećati snagu za 10 MW iz čvorišta A u čvorište B i između ta dva čvorišta postoji izravni vod A–B, neće svih tih novih 10 MW poteći tim vodom A–B u uzamčenoj mreži, nego će se tih 10 MW *razliti*, teoretski po svim granama mreže a praktički i po vrlo udaljenim granama od tih čvorišta A i B.

Briga o prevenciji, kako kratkoročnoj – tako i dugoročnoj, *zagušenja* u vlastitoj prijenosnoj mreži, te spojnih vodova prema susjednim mrežama, postaje time vrlo bitna preokupacija operatora. Kratkoročno, on će nastojati poticati angažmane u smjeru suprotnom od najčešće traženih smjerova prijenosa za pojedini vod kojem prijeti zagušenje, a dugoročno zalagat će se za gradnju novih vodova na najzagušenijim potezima. Nema druge!

Prijenos električne energije u europskim asocijacijama

Europska Unija potiče najšire međudržavno povezivanje radi osiguranja prijenosne moći za prekogranične prijenose električne energije i time angažman proizvodnje u jednoj državi za potrebe potrošnje u drugoj državi, ako je to u komercijalnom interesu dobavljača i kupaca. Dakle, potiče *Europu bez granica* i u elektroprivrednom sektoru. Od sredine 2004. godine primjenjuje se Uredba Europske Unije 1228/2003 o uvjetima pristupa mreži radi prekogranične trgovine električnom energijom. (Razlika između uredbe i direktive u pravnom poretku Europske Unije je ta što se uredba izravno i doslovno obvezatno primjenjuje u državama-članicama, a direktiva traži provedbu putem zakonodavstava zemalja-članica.) Spomenuta uredba ima važnost za Europsko ekonomsko područje (EEA[94]) koje čine, pored članica EU-a, i tri države-nečlanice: Island, Lihtenštajn, te Norveška.

Cilj te uredbe je donošenje pravila o prekograničnoj trgovini električnom energijom, radi poboljšanja nadmetanja na unutarnjem tržištu (*unutarnjem*, u smislu Europske Unije) uzimajući u obzir specifičnosti nacionalnih i regionalnih tržišta. To uključuje ustroj za utvrđivanje naknada za prekogranični prijenos (CBT-ustroj[95], odnosno ITC[96], interoperatorsku kompenzaciju, kako se zove od početka 2005. godine) i dodjelu raspoložive prijenosne moći spojnih vodova, dakle vodova koji prelaze državne granice među zemljama-članicama Europske Unije. Zemlje koje su naglašene izvoznice (npr.Francuska) ili koje su naglašene uvoznice (npr.Italija) svojim naglašenim izvozom ili uvozom opterećuju tranzitom preostale mreže. Njihova se energija *razlije* po gotovo cijeloj europskoj mreži, pa je uređeno da to plate operatorima mreža koje obavljaju taj tranzit.

Godine 1999. osnovan je ETSO[97], Udruga europskih operatora prijenosnih sustava zemalja-članica EU-a. Kompatibilan je europskim interkonekcijama (UCTE, NORDEL, UKSOA, ATSOI), jer su interkonekcije okrenute tehničko-tehnološkoj strani povezivanja između nacionalnih prijenosnih mreža, a ETSO je više okrenut organizacijsko-pravno-komercijalnom stranom takva povezivanja, ujednačujuću uvjete pristupa mreži u svim zemljama-članicama, te uvjete korištenja mrežama, a osobito za prekograničnu trgovinu. Obuhvaća operatore prijenosnih sustava, u svim državama-članicama EU-a, te u Norveškoj i Švicarskoj. Od 2004. godine član je i operator prijenosnog sustava iz Rumunjske, kandidata za članicu EU-a.

Smatraju da se iz njihovih prijenosnih mreža, 2004. godine opskrbljuje više od 490 milijuna stanovnika, uz godišnju ukupnu potrošnju od oko 3200 TWh. Duljina vodova vrlo visokog napona (400 i 220 kV) je veća od 290 tisuća kilometara. Dakle, više od sedam puta bi se mogao obujmiti Zemljin ekvator, samo tim 400 i 220 kilovoltnim vodovima pod ingerencijom članica ETSO-a!

---

[94] European Economic Area
[95] Cross-Border-Tarification-Mechanism
[96] Inter-TSO-Compensation
[97] European Transmission System Operators

13

Gubici u mreži

Gubici (u električnoj mreži), nes(p)retno imenovan pojam![98] Izabravši takav naziv tom pojmu, izložili smo taj pojam krivom njegovomu shvaćanju: nešto što je nepažnjom, previdom, nemarom izgubljeno a da je bilo pozornosti, nadzora, skrbi, moglo se to izbjeći. Nešto što nam je bilo u džepu – a nehajno smo izgubili. U nas, najčešće upotrebljavan 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 čak promijeniti u dobitak. Da li je tome tako pri shvaćanju gubitaka u električnoj mreži?

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 točnije 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 dadu izbjeći.

Korisna energija je uložena energija umanjena za nekorisnu energiju ili umanjena za gubitke energije. Primjerice, ako električnu energiju pretvaramo u svjetlo žaruljom s žarnom niti, ostvarit ćemo tu pretvorbu tako da 85–95 posto električne energije pretvorimo u toplinu i zračenje nevidljivog spektra, a samo 5–15 posto te energije u svjetlo. Te su gubici u tom primjeru čak enormnih 85–95 posto, jer žarulju nismo instalirali za grijanje nego za svjetljenje.

Za prijenos i distribuciju električne energije koriste se vodovi. Za naše razmatranje bitni su njihovi vodiči izrađeni iz materijala povoljnog specifičnog električnog otpora, najčešće aluminija, vrlo rijetko bakra[99]. Što su vodiči većeg presjeka, dakle deblji, to im je manji električni otpor. Ne ide se, iz praktičnih razloga, u nedogled s presjekom vodiča – promjer vodiča od 30-tak milimetara redovito je gornja granica. Takav promjer odgovara presjeku od oko 500 četvornih milimetara. Vodiči tog presjeka imaju otpor od 0,06 oma po kilometru njihove duljine, ako su izvedeni iz aluminijskog opleta omotanog oko čelične jezgre (*alučelika*).

Teče li vodičem struja, prirodno je neizbježno njegovo zagrijavanje koje je to veće što je otpor vodiča veći i što je struja tim vodičem veća, točno ovisi o kvadratu struje i otporu vodiča[100]. Ako je primjerice otpor vodiča 10 oma a struja koja teče tim vodičem 5 ampera, neizbježna toplina kojom će vodič *grijati* okolinu je 5 na kvadrat pomnoženo s 10, dakle

[98] Ali i u drugim jezicima je jednako: *Verlust* u njemačkom, *loss* u engleskom, *perte* u francuskom su riječi koje se upotrebljavaju za nazivanje tog pojma, a ne prevode se na hrvatski drukčije nego *gubitak.*

[99] Nema danas tvari koja na normalnoj tremperaturi okoline ne bi imala električni otpor. Takozvane supravodljive tvari koje nemaju otpor, ali pri temperaturama još uvijek značajno nižim od prosječne temperature okoline (danas: na oko minus dvjestostotinjak Celzijevih stupnjeva). Razvoj na tom području još uvijek nije rekao zadnju riječ...

[100] Uz struju I i otpor vodiča R, gubici su $P_g = I^2 \times R$.

250 W. Ako to stanje traje 4 sata, energija nepovratno pretvorena u toplinu biti će ravno 1 kilovatsat. Dakako, pretpostavili smo da se taj vodič ne nalazi u kakvu električnom grijaču, kojemu bi svrha bila upravo grijati okolni prostor!

Radi li se o trofaznom vodu izgrađenom iz udvojenih alučeličnih vodiča presjeka 490/65 četvornih milimetara (omjer presjeka aluminijskog plašta i čelične jezgre), duljine 200 kilometara (to je približno vod 400 kV Ernestinovo–Žerjavinec), tada je otpor jednog faznog vodiča ½×200×0,06 = 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[101]. Kvadriramo li tu struju i pomnožimo s otporom vodiča i sve još pomnožimo s 3, 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[102] ili 1,8 posto prenesene snage (slika 13.1). Prijenos od 500 MVA predstavlja nešto manje od polovine prijenosne moći tog voda, a gubici pri dvostrukoj snazi bili bi 4 puta veći, dakle čak 36 MW. Za druge snage prijenosa, gubici bi bili:

Snaga (MVA)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
Gubici (MW)	0,4	1,4	3,2	5,8	9,0	13	18	23	29	36	44

Ako bismo – da primjer bude što jednostavniji – umjesto stvarno promjenjivog opterećenja tog voda, uzeli da je opterećenje voda u svakoj četvrtini godine stalno i da iznosi 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 23652 MWh ili okruglo oko 24 milijuna kilovatsati. Što nije malo! I ne može se nikakvim mjerama izbjeći[103].

Ipak, što preostaje? Samo dogradnja mreže još jednim takvim paralelnim vodom! Koji bi koštao, kao red veličine, oko 300 milijuna kuna. Koliko bismo uštedjeli gubitaka takvom dogradnjom mreže? Gubici bi se prepolovili jer bi se otpor vodiča svake faze prepolovio, dakle ušteda u gubicima bila bi 12 milijuna kilovatsati[104]. Koliko novčano vrijedi ta ušteda? Računajmo s uštođenom tolikom proizvodnjom u elektranama po prosječnoj cijeni u 2004. godini od 25 lipa/kWh, dakle 0,25×12 = 3 milijuna kuna. U usporedbi te uštede s ulaganjima u novi vod proizlazi da bi se on isplatio za 100 godina korištenja, dakle za mnogo više vremena od čitava životnog vijeka tog voda.

Za koliko bismo morali prosječno podići cijenu kilovatsata ako bismo svake godine željeli mrežu dograditi takvim novim vodom ili njegovim ekvivalentom – što se tiče novčanog ulaganja? Tri stotine milijuna kuna predstavljaju 30 milijarda lipa, a isporučena energija je u 2004. godini bila oko 15 milijarda kilovatsati, trebalo bi dakle podići prosječnu cijenu za 2 lipe po svakom isporučenom kilovatsatu ili za visokih 4 posto od prosječne tadašnje prodajne cijene (50 lipa/kWh, bez PDV).

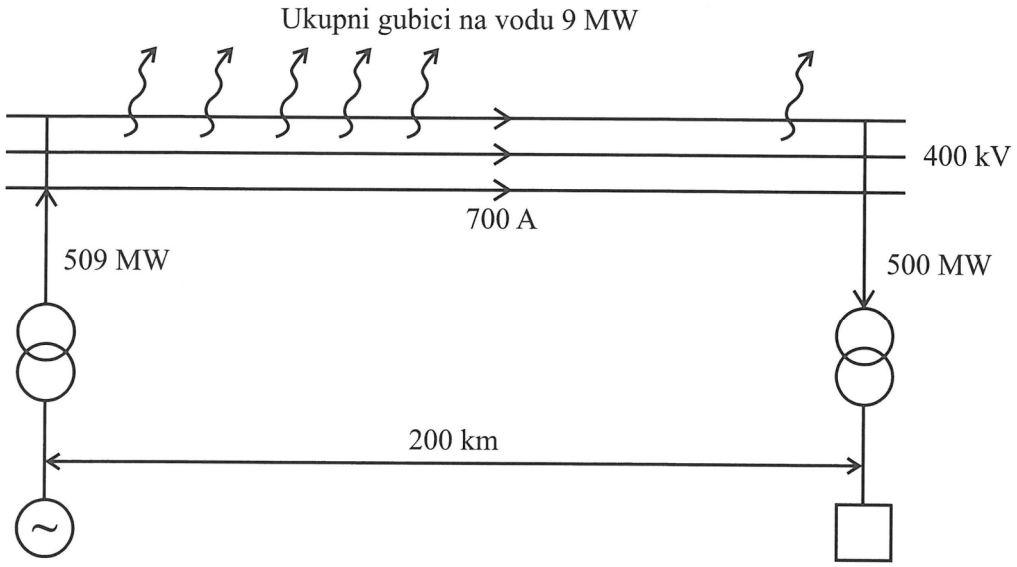
---

[101] Ako je snaga S a napon U, tada je struja $I = S/(\sqrt{3} \times U) = S/(1{,}73 \times U)$.

[102] To je jednako kao da na svakih 22 metra tog dalekovoda postoji jedna električna grijalica snage 1 kW, koja grije okolni zrak.

[103] 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! Možda bliže razumijevanju: da smo vodu tiskali pumpom, kakvim cjevovodom na neku udaljenost, također bismo morali uložiti energiju da svladamo trenje, utrošivši tu energiju za strujanje vode kroz cjevovod.

[104] Tako, dakako, u slučaju kada bi ukupno opterećenje dvostrukog voda ostalo jednako kao i ranijeg jednostrukog. U stvarnosti, uz nepromijenjene okolnosti u svim čvorištima mreže, opterećenje dvostrukog voda promijenilo bi se jer mu se smanjila impedancija (prividni otpor) te bi došlo do nove raspodjele svih tokova snaga u mreži.



Slika 13.1. Gubici na vodu 400 kV, *dugom* 200 km, *uz opterećenje na kraju voda od* 500 MW

Usporedimo li tu uštedu s 587 milijuna kilovatsati što smo ih ukupno *izgubili* u prijenosnoj mreži HEP 2004. godine, izlazi da bi se gubici u mreži smanjili na 575 milijuna kilovatsati. Kako je isporučena energija iz prijenosne mreže u toj godini bila oko 15 milijarda kilovatsati izlazi da su gubici u prijenosnoj mreži predstavljali 3,766 posto uložene energije a nakon te zamislive dogradnje smanjili bi se na 3,692 posto, dakle smanjili bi se za manje od 0,1 postotnog poena uz ulaganja – kako smo već rekli – od 300 milijuna kuna. Zapravo malo u usporedbi s ulaganjem! Siromašna društva teško si to mogu priuštiti – bogatija mogu, te će biti još bogatija.

Na visokonaponskom vodu ostvaruju se i gubici korone (lokalni proboji zraka u blizini vodiča, nosivog i spojnog pribora zbog jačeg električnog polja u toj zoni od električne čvrstoće zraka), ovisno o naponu, na koje gubitke velik utjecaj imaju amosferske prilike duž trase voda. Na našem 400 kilovoltnom vodu, u prosječnim godišnjim okolnostima, ti su gubici oko 3,4 kW po kilometru voda.

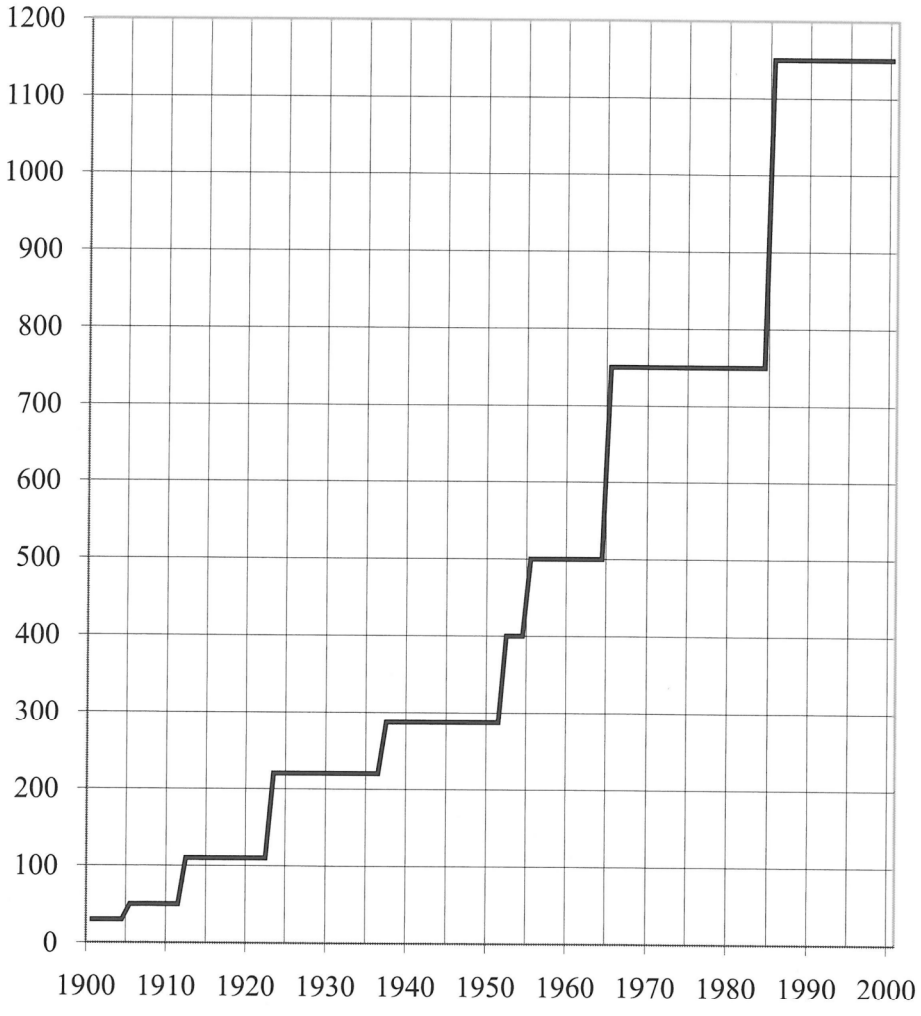
Energija se gubi i u transformatorima (i oni se griju), ne samo u vodovima. Prilike su nešto složenije, ali tu na veličinu gubitaka ponajprije utječe konstrukcijska starost transformatora, jer s vremenom je dolazilo do sve učinkovitijih konstrukcija. Tako se smanjenje gubitaka svodi ponajprije na zamjenu velikog broja vrlo starih transformatora, ali ponovno uz velika ulaganja i ne svođenja gubitaka u njima na nulu, već samo na neku manju ali još uvijek osjetnu vrijednost.

Gubicima u prijenosnoj mreži valja dodati i gubitke u distribucijskoj mreži, pa tako dolazimo do ukupnih gubitaka u mreži. Tu jest problem, naime u gubitke u hrvatskoj distribucijskoj mreži uračunava se i ona električna energija koja je ukradena (kažemo *neovlasno potrošena*), što prividno povećava gubitke u (ponajprije distribucijskoj) mreži. Gubici u distribucijskoj mreži HEP-a, uz takve opaske, iznosili su 2004. godine 1653 GWh ili 2,8 puta više nego u prijenosnoj mreži (587 GWh).

14

Razvoj prijenosnog napona

Do polovice prvog desetljeća prošlog stoljeća u SAD se već primjenjuje napon 50 i 60 kV. Godine 1905. u pogonu je prvi 50 kilovoltni vod Uppenbornwerk–München, najprije u Evropi na tako visokom naponu. Napon 110 kV u primjeni je od 1911. godine u Njemačkoj. Prvi vod pod naponom 220 kV je u pogonu od 1922. godine u SAD i od 1929. godine u Njemačkoj, a od 1952. godine vod pod naponom 380 kV u Švedskoj. Od polovine pedesetih godina prošlog stoljeća, u tadašnjem SSSR se primjenjuje napon 500 kV. Od 1965. u primjeni je napon 735 kV u Kanadi, a od 1969. godine napon 765 kV u SAD. Danas je u europskim zemljama, uključujući Hrvatsku, najviši napon 400 kV (odnosno 380 kV, kako se već u pojedinoj zemlji naziva), izuzev europskog dijela Zajednice neovisnih država, gdje je najviši napon 750 kV i po jednog dalekovodnog poteza tog napona prema Mađarskoj, Poljskoj i Rumunjskoj/Bugarskoj. Najviši prijenosni napon izmjenične struje je u azijskom dijelu Rusije, 1150 kV, primjenjen na vodu Ekibastuz–Kokčetav u komercijalnom pogonu od 1985. godine (slika 14.1).



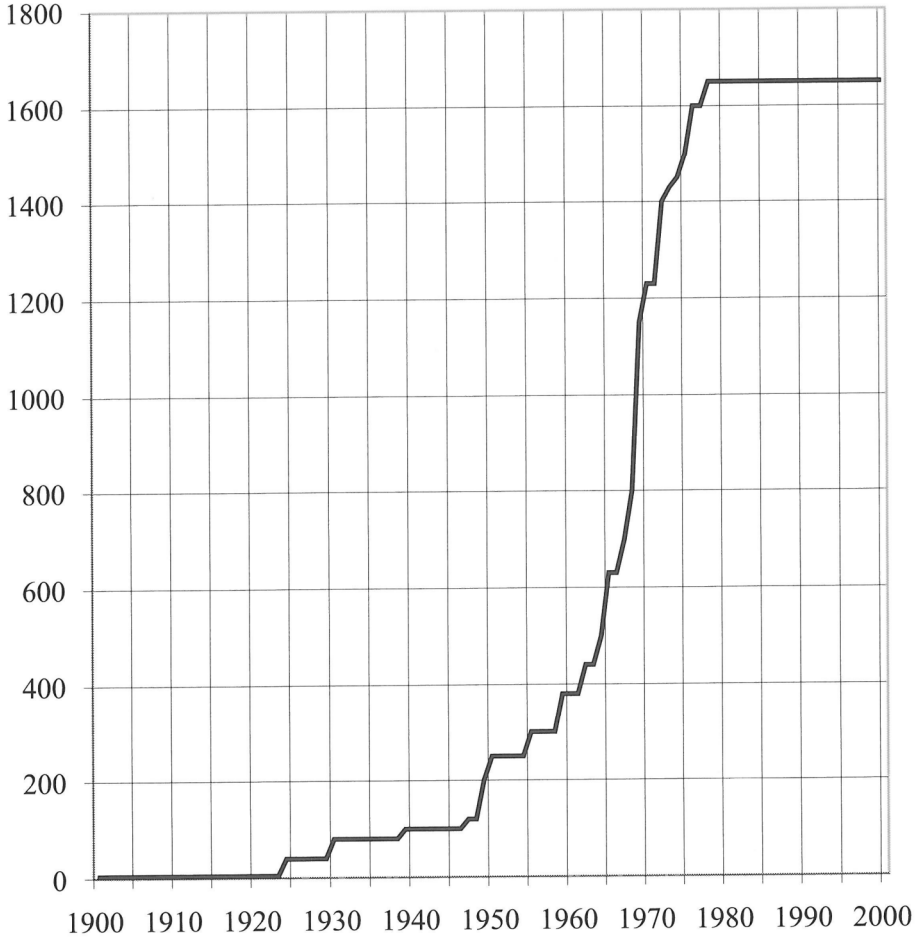
Slika 14.1. Najviši prijenosni izmjenični napon u svijetu (kV)

Uvjetovanost rasta prijenosnog napona

Čime je bio uvjetovan takav ostvareni razvoj prijenosnog napona, što su ograničenja pojedine etape, a što čine sagledive predstojeće granice? Ukazano je na razloge eksplozivnog razvoja korištenja električnom energijom i još bržeg rasta prijenosa u tome.

Od kraja pretprošlog stoljeća, uporno raste jedinična snaga turbogeneratora i hidrogeneratora, čime se ostvaruje bolji stupanj djelovanja pri pretvorbi primarnog oblika energije u električni. Današnji najveći turbogeneratori imaju snagu 1000–1600 MVA, a najveći hidrogenerator ima snagu 800 MVA (slika 14.2). I broj agregata na lokaciji jedne elektrane povećava se. Najveća hidroelektrana na svijetu Itaipu u punom pogonu, ima instaliranu snagu od 12,6 GW. Najveća nuklearna elektrana, Fukušimi u Japanu ima instaliranu snagu 9 GW. Koncentracija na jednoj lokaciji smanjuje troškove građenja i iskorištava u potpunosti lokacijske mogućnosti (vodnih snaga za HE ili rashladnih mogućnosti, za TE i NE).

S 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



Izvor: Elektrizitaetswirtschaft 20/1976

Slika 14.2. Najveće jedinične snage turbogeneratora u svijetu (MVA)

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 1000 ampera[105]. Za dva takva vodiča u snopu, dopuštena struja je, dakle, oko 2 kiloampera. Uz napon od 400 kV, omogućen je prijenos od 1350 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 vodi se uz znatno niže opterećenje. Prirodna snaga voda je ona pri kojoj je induktivna potrošnja voda jednaka kapacitivnoj proizvodnji tog voda. Ta snaga neovisna je od duljine voda, jer svaki novi kilometar voda pridonosi, kako novim kapacitetom – tako i novim induktivitetom, jednakim onima što su ih pridonijeli i prethodni kilometri istog voda. Pogodna je za pogon mreže jer vod ne mijenja potražnju jalove snage u mreži. Pri prijenosu prirodne snage, napon na početku i napon kraju voda jednaki su po veličini, jedino između ta dva napona postoji fazni pomak. Pri snazi koja se prenosi vodom manjoj od prirodne snage, vod se ponaša kao kondenzator (kompenzator jalove snage) a pri većem prijenosu vod predstavlja dopunsko jalovo opterećenje u mreži. Za naše vodove 400 kilovolta prirodna je snaga 530 MW.

Ekonomični prijenos ne predstavlja nijednu od spomenutih vrijednosti. Prema Kelvinovom pravilu to je ona snaga prijenosa pri kojoj su godišnji troškovi gubitaka električne energije u vodičima jednaki godišnjoj amortizaciji investicijske vrijednosti voda ovisnim o vodičima uvećanoj za godišnje troškove održavanja voda. Veći troškovi gubitaka vodili bi potrebi da se izgradi investicijsko skuplji vod (s debljim vodičima i masivnijim stupovima). Manji troškovi gubitaka ukazivali bi da je izgrađen preskupi vod. Gubici u vodičima ovise o kvadratu struje (dakle i o kvadratu snage koja se prenosi vodom) i otporu vodiča, koji je određen presjekom i materijalom vodiča. Godišnja energija gubitaka ovisna je i o trajanju maksimalnog opterećenja voda, jer je vod – u pravilu – neravnomjerno opterećen tijekom godišnjih 8760 sati.

Za izgrađeni vod određenog napona i određenog presjeka vodiča, ekonomična snaga to je veća što je cijena aluminija i čelika veća u odnosu spram cijene električne energije, također je veća što je godišnje trajanje maksimalnog opterećenja manje. Vrlo skupa električna energija vodi manjoj ekonomičnoj snazi jer je skuplje pokrivanje gubitaka električne energije. Priključni vod za termoelektranu s vrlo velikim godišnjim trajanjem maksimalne snage imat će manju ekonomičnu snagu, a vod koji povezuje neku hidroelektranu s malim godišnjim trajanjem maksimalne snage, imat će veću ekonomičnu snagu. Za prosječne prilike u hrvatskoj 400 kilovoltnoj mreži, određena je ekonomična snaga od 640 MW za godišnje trajanje maksimalnog opterećenja 4000 sati i 615 MW za trajanje 6000 sati.

Za 500 kilovoltni vod ekonomična snaga bila je 950 MW, za 750 kilovoltni vod ekonomična snaga je oko 2000 MW, a za 1150 kilovoltni vod je to nešto ispod 4000 MW, prema prilikama u svojedobnoj sovjetskoj mreži.

Gubici u vodičima dalekovoda obrnuto su srazmjerni 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 1000 A. Ako bi se radilo o vodu s faznim vodičima kojima je otpor 0,3 oma, gubici u tom vodu su 3×1000×1000×0,3 = 900000 W, dakle 900 kW. Primjenimo li dva puta veći napon, 220 kV, to bi vodilo dva puta manjoj struji, dakle 500 A. Gubici u tom vodu sada bili bi 3×500×500×0,3 = 225000 W, dakle 225 kW. Udvostručenje napona dovelo bi do četiri puta manjih gubitaka na istom vodu uz prijenos iste snage. To je temeljni razlog

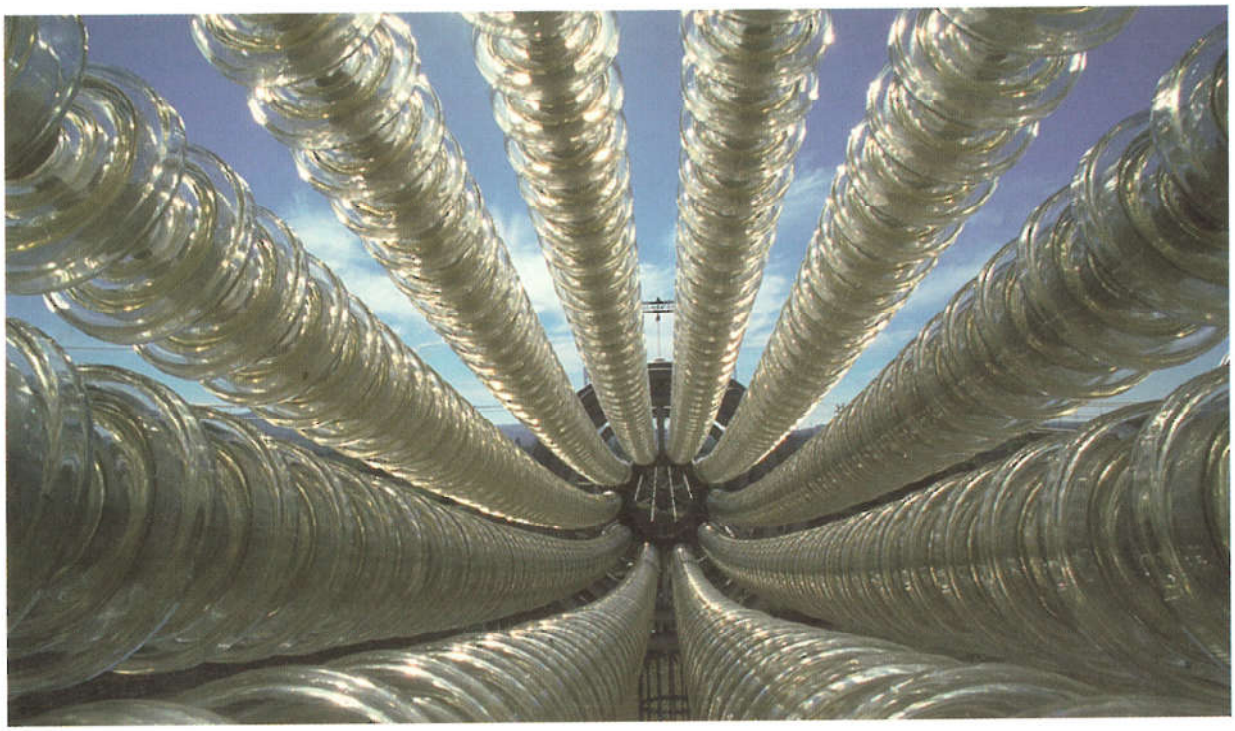
[105] Pri temperaturi okoline +35 Celzijevih stupnjeva i brzini vjetra 0,6 m/s; tada se vodič zagrije na +80 Celzijevih stupnjeva.

za primjenu sve viših prijenosnih napona, a – ujedno – i povijesni razlog primjene izmjenične struje za prijenos električne energije, jer se izmjenična struja dade jednostavno transformirati na poželjno visoki napon. I – opet – transformacijom *vratiti* na povoljno nizak napon!

Jasno je da je porast snaga agregata i instaliranih snaga elektrana nužno povezan s odgovarajućim povećanjem primjenjene naponske razine u prijenosnoj mreži. Primjerice elektrana od oko 1 GW (1000 MW) instalirane snage, može se racionalno i kvalitetno povezati na mrežu pomoću dva voda pod naponom 400 kV. Priključak uz napon 220 kV tražio bi izgradnju sedam vodova, što je teško prihvatljivo.

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 da bi najbolje bilo 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.

Međutim, tehnološko usvajanje nove naponske stepenice je složeno i skupo. Svu osnovnu opremu treba razviti i konstruirati za taj novi napon. Koliko je to zahtjevno, pogotovo danas – kada se rub napona pomiče iznad milijun volta, ilustrira podatak da već više od trideset godina traje istraživanje i razvoj iduće naponske stepenice, reda 1000 kV (SAD, Francuska, Ujedinjeno Kraljevstvo, Italija, bivši SSSR), ponajprije u izgrađenim visokonaponskim laboratorijima, opremljenim za ispitivanja tim ekstra visokim naponima. Primjerice, u Italiji je 1971. godine ENEL[106] (talijanska nacionalna elektroprivredna kompanija) uspostavio ispitni laboratorij Suvereto, u kojem se odvija istraživanje pod imenom «1000 kV pojekt» i u kojem je podignut vod toga napona, duljine 3 kilometra, gdje se ispituje prototipna oprema za postrojenja i vodove nazivnog napona 1000 kV (slika 14.3).



Slika 14.3. Deseterostruki izolatorski lanac na pokusnom vodu 1000 kV *u Suveretu*

[106] Ente Nazionale per l'Energia Elettrica

Gdje je današnja sagledliva granica potreba?

Za Europu, u kojoj se prirodnim okolnostima uvjetovane lokacije (vodnih snaga ili nalazišta ugljena) dopunjuju lokacijama nuklearnih elektrana više uvjetovanim središtima potražnje, napon 400 kilovolta će u bližem vremenu biti dovoljan jer se ne radi o prevelikim prijenosnim udaljenostima između čvorišta (stotinjak ili nešto više kilometara).

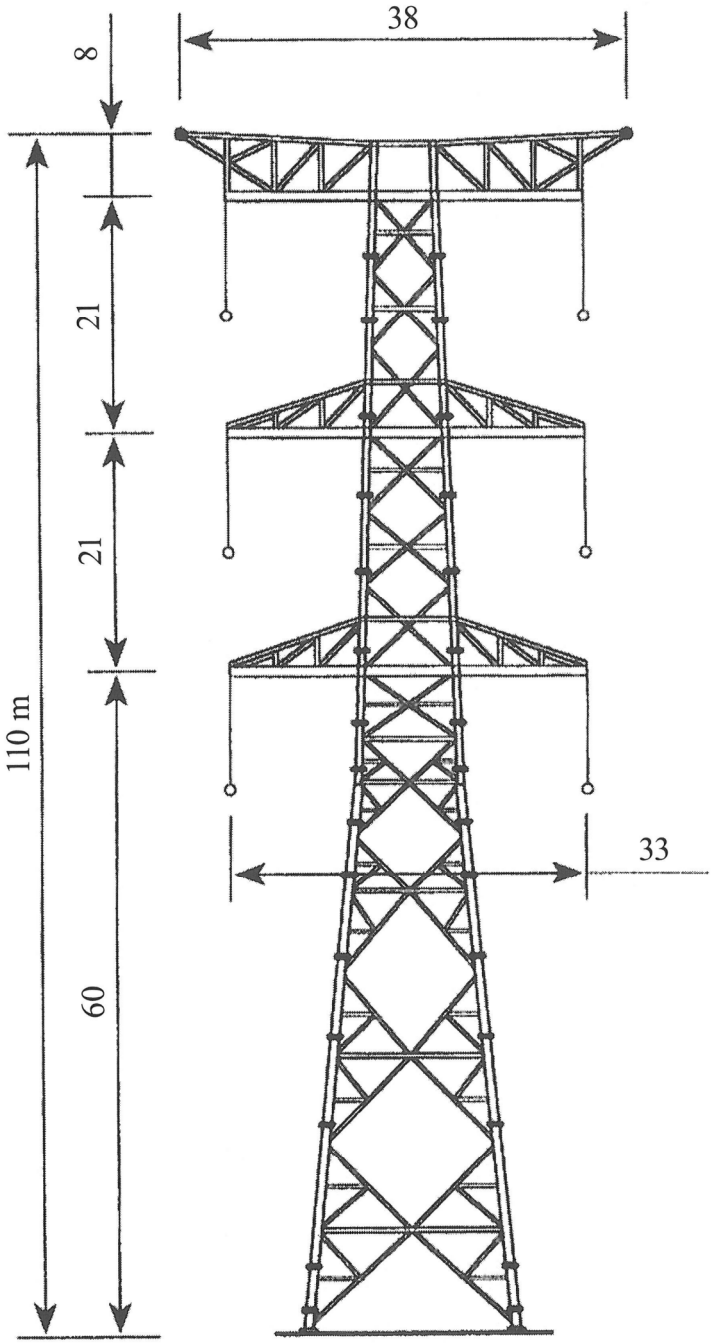
Prijenos je, naime, ograničen još jednom karakteristikom: stabilnošću prijenosa, pored ograničenja zagrijavanjem vodiča. Uz određeni napon mreže ne može se vodom prenijeti veća snaga od one koja proizlazi iz omjera kvadrata tog napona i reaktancije[107], pri čemu je reaktancija srazmjerna duljini voda. Udvostručenje napona, dakle učetverostručuje, a povećanje duljine voda uporno smanjuje prijenosnu moć. Rusija, SAD, Kanada (u manjoj mjeri Švedska i još manjoj Italija) imaju, povrh velikih snaga, i velike daljine prijenosa između potrošačkih i proizvođačkih područja. Stoga moraju posezati i za većim naponom.

U vezi s naponom, istaknimo još jednu važnu pogonsku okolnost – nužnost regulacije napona i jalove snage u elektroenergetskom sustavu odnosno prijenosnoj mreži. Prijenos jalove snage posljedica je potražnje jalove snage trošila, transformatora i vodova u mreži, radi izmjenične uspostave i razgradnje magnetskog polja u njihovim magnetskim krugovima. U tom pogledu, među trošilima osobito se ističu elektromotori, čije funkcioniranje 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 se jalova snaga *njiše* između trošila i kondenzatora ne opterećujući preostalu mrežu.

Elementarno je: prijenos ozbiljnije komponente jalove snage uz komponentu djelatne snage, snizuje 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 kada bi naponi u svim čvorištima mreže bili po veličini posve jednaki. To bi značilo da su svi vodovi opterećeni prirodnom snagom (te je proizvodnja jalove snage u njima samima jednaka potrošnji jalove snage u njima samima[108]), te da je u svim čvorištima mreže potražnja jalove snage jednaka proizvodnji jalove snage, 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

[107] Točni izraz je $P_{12} = (U_1 \times U_2/X) \times \sin \delta$, gdje je 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, δ = 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 bi 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 1600 MW. Uz praktičnu granicu pri $\delta = 30°$ (tada je $\sin \delta = 0{,}5$), stabilna prijenosna moć tog voda bila bi 800 MW.

[108] Govorimo o potrošnji i proizvodnji jalove snage, ispravnije 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, koji se ostvaruje u kondenzatorima ili naduzbuđenim generatorima u mreži. (Generator u poduzbuđenom stanju ponaša se kao prigušnica, dakle *troši* jalovu energiju.)



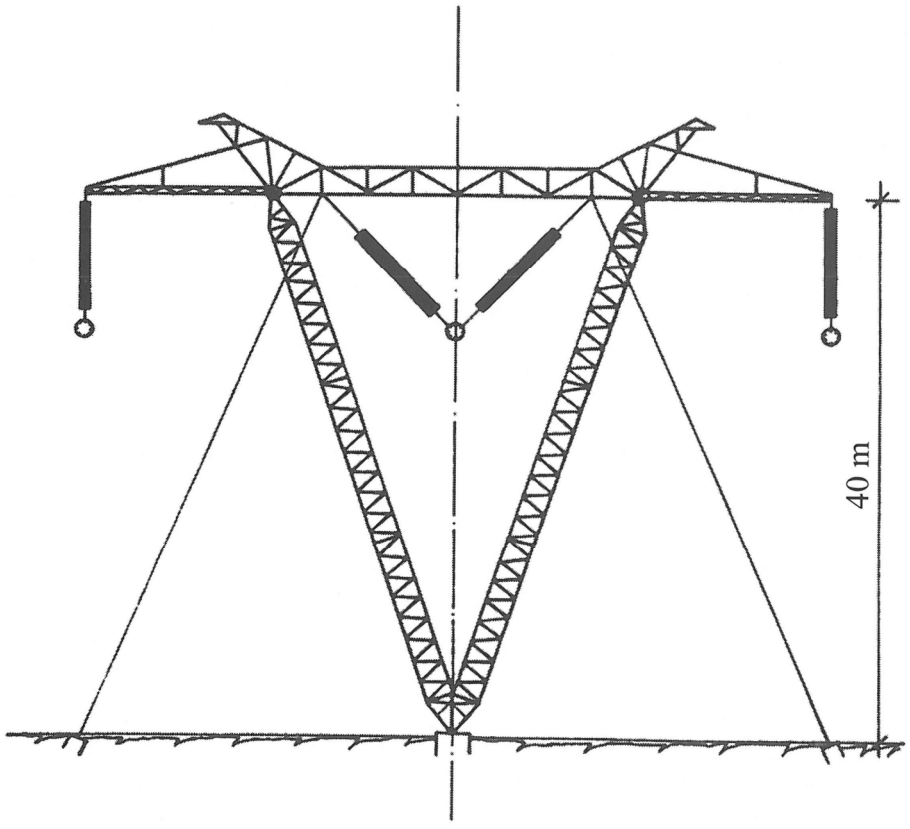
Slika 14.4. Stup japanskog DV 2×1000 kV

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 pretjerana 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.

Gdje su, danas sagledive, mogućnosti za povećanje napona? Osim, i ponajprije, konstrukcije transformatora za takav napon, treba konstruirati i sve druge aparate u rasklopnom postrojenju (prekidač, rastavljač, mjerni transformator i odvodnik prenapona). Međutim, nadzemni dalekovod je ona jedinica mreže, koja se na pojedinoj naponskoj razini treba protegnuti tisućama kilometara, te prema tome njegova konstrukcija mora biti tehnički svladiva, ekonomski prihvatljiva i ekološki podnošljiva.

Izdvojimo samo prostorno i estetsko opterećenje i povežimo ga s naponom. Razmak između faznih vodiča nadzemnog dalekovoda mora biti toliki da pouzdano ne dođe do električkog preskoka pri najvećem prenaponu u mreži. Taj može biti više nego dvostruko veći od pogonskog napona, a ograničava se odgovarajućom konstrukcijom prekidača. U mrežama vrlo visokog napona uspjelo je prenapone ograničiti u području 1,5 do 2 puta pogonski napon.

Očekujemo, dakako, da višem naponu odgovara veća udaljenost koja je sigurna na preskok. U području preskočnog napona ispod 1000 kV ta je ovisnost gotovo linearna, a nakon 2000 kV naglašeno se pogoršava: za mala povećanja preskočnog napona potrebna su sve veća i veća povećanja udaljenosti. To bi vodilo tehnički, prostorno i ekonomski neprihvatljivim dimenzijama stupova. Stup ruskog voda 1150 kV već ima gredu udaljenu 40 metara od tla, a razmak između krajnjih faza (primjenjen je horizontalni razmještaj vodiča) čak 46 metara (slika 14.5)! Koncem devedesetih godina prošlog stoljeća izvedeni su prvi potezi u mreži Japana za nazivni napon 1000 kV, ali se – u početnoj etapi – koriste pod naponom 500 kV. Visina stupova je 110 metara, a okomiti razmak između krajnjih faza je 42 metra (primijenjen je vertikalni razmještaj vodiča u dvostrukom vodu) (slika 14.4).



Slika 14.5. Ruski stup 1150 kV

Ako bi se prekidače za najviše napone uspjelo konstruirati da se ostvari faktor prenapona manji od 1,5 – tada bi se mogao primjeniti pogonski napon od 1500 kilovolta. To je vjerojatna vrijednost gornje granice prijenosnog napona u budućnosti.

Naponske razine današnjih mreža

Navedimo, na kraju, uobičajne današnje nazive naponskih razina mreža, onako kako ih zove elektrotehnička praksa te kratice tih naziva, kakve se primjenjuju na hrvatskom, engleskom, njemačkom i francuskom jeziku.

Naponska razina	hrv.	engl.	njem.	fr.	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 1000 kV
ultra visoki napon	UVN	UHV	UHS	UHT	jednako ili više od 1000 kV

Značenja tih kratica, primjerice za *visoki napon* su: HV = high voltage (engl.), HS = Hochspannung (njem.) i HT = haute tension (fr.) te za *vrlo visoki napon*: VHV = very high voltage (engl.), HöS = Höchstespannung (njem.) i THT = très haute tension (fr.).

15

Prijenosni dalekovodi

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 ikakva korisnog prijenosa. Stoga se, u uobičajenim okolnostima, za trofazni prijenos isključivo primjenjuju *nadzemni vodovi*[109] visokog napona, dalekovodi.

Prijenosni dalekovodi, u kontroliranoj, no ipak nikako zanemarivoj mjeri, izvor su suvremenog i neizbježnog opterećenja okoline. U najmanju ruku – estetskog. Zbog svoje znatne visine i širine, te protezanja stotinama kilometara, fizički sprečavaju korištenje prostorom na kakav drugi način, te izgradnju drugih objekata. Ometaju poljoprivredno i šumsko gospodarenje te promet – osobito zračni. U Njemačkoj, vodovi 110 kV i većeg napona zauzimaju oko 1 posto državnog teritorija.

Svojstva nadzemnog dalekovoda

Očigledno, izbor i konstrukcija pojedinih komponenata dalekovoda, te pažljiv izbor dalekovodnih trasa, odgovoran je posao jer su promašaji velikog prostornog i vremenskog dometa. Naknadno uočen, eventualni sustavni nedostatak značio bi njegovo otklanjanje na tisućama kilometara i predstavljao nesagledive smetnje funkcioniranju elektroenergetskog sustava. Dalekovod mora imati potrebna električka svojstva, a mehaničku sigurnost kakva se inače očekuje od građevinskih objekata.

Ukratko specificirani, električki zahtjevi prema dalekovodu su: vodiči moraju biti takvi da mogu trajno provoditi pogonsku struju i kratkotrajno voditi povećane struje kvara. Izolatori i zračni razmaci vodiča od konstrukcije stupa moraju biti takvi da mogu trajno podnositi najviši pogonski napon, te onemogućiti preskok pri prenaponima, i u otklonjenom stanju vodiča zbog bočnog vjetra. Dalekovod je izložen atmosferskim električkim pražnjenjima, te mora biti otporan na njihovo djelovanje.

Visina vodiča iznad tla i udaljenost vodiča od drugih objekata mora biti takva da se onemogući električni preskok, i u slučaju da se na tlu ili objektima nalaze ljudi u očekivanim aktivnostima i pri tome s uobičajenim pomagalima. Elektromagnetske i električne smetnje koje dalekovod emitira moraju biti neopasne za ljude i ostale objekte u zoni djelovanja.

Mehanički zahtjevi su: stabilnost i elastične deformacije svih elemenata dalekovoda u svim električkim i atmosferskim okolnostima: pri sniježnom ili ledenom omotaču na vodičima i pri vjetru propisano[110] očekivane brzine i smjera poprečno na trasu voda.

---

[109] OHL = Overhead Line (engl.), FL = Freileitung (njem.)

[110] Dalekovod se ne dimenzionira na ekstremno velike brzine vjetra, kakve su statistički gotovo neočekivane, nego svaka država propisuje za određena svoja područja najveće brzine vjetra kojih se pri projektiranju dalekovoda mora pridržavati. Jednako je i s očekivanom debljinom zeleđenja na vodičima.

Komponente nadzemnog dalekovoda

Nadzemni dalekovod sastoji se iz sljedećih glavnih komponenata: fazni vodiči, zaštitno uže (zaštita od atmosferskog električnog pražnjenja), izolatori, spojna, nosiva i zaštitna oprema, te stupovi (s temeljima) i *uzemljenje*[111].

Prema položaju u trasi voda, stupovi mogu biti: linijski i kutni. Linijski stupovi primjenjuju se na ravnom dijelu projekcije trase voda na horizontalnu ravninu, a kutni na mjestu loma te projekcije trase. Prema načinu ovješenja vodiča, stupovi su nosivi i zatezni. Nosivi stupovi nose vodiče i zaštitno uže (zaštitnu užad) uz načelno vertikalne sile (kad nema dopunskog horizontalnog opterećenja vjetrom poprečno na vodiče). Zatezni stupovi, dijele dalekovod na dionice, zatezna polja, i između dva zatezna stupa se vodiči zatežu uzdužnom silom kod izgradnje ili njihova popravka. Rasteretni stupovi su oni koji podnose sile zatezanja vodiča samo s jedne strane, to su svakako krajnji stupovi, na početnom i završnom kraju svakog voda. Razmak između dva susjedna stupa u vodu naziva se raspon, u pravilu raspon je u ravnici po prilici nešto više od 300 metara na našim prijenosnim vodovima.

Osim u iznimnim okolnostima, konstrukcija dalekovodnih *faznih vodiča*[112] vrlo je ujednačena: koristi se *alučelično uže*[113]. Dakle, jezgra spletena od čeličnog užeta omotana opletom od aluminijskih žica u više slojeva. Primjerice: na našim 400 kilovoltnim vodovima koristi se takvo uže koje ima čeličnu jezgru od 65 četvornih milimetara i aluminijski omotač od 490 četvornih milimetara. Vanjski promjer takva užeta je nešto više od 3 centimetra. Upotrebljavaju se i kombinirani vodiči kojima je jezgra izrađena iz čeličnog užeta, a oplet iz legure aluminija sa silicijem i magnezijem (legura *aldrej*), a i vodiči koji su u cijelosti izrađeni od te legure. Svojstveno je toj leguri da ima znatno bolja mehanička svojstva od aluminija uz nešto lošija električka svojstva.

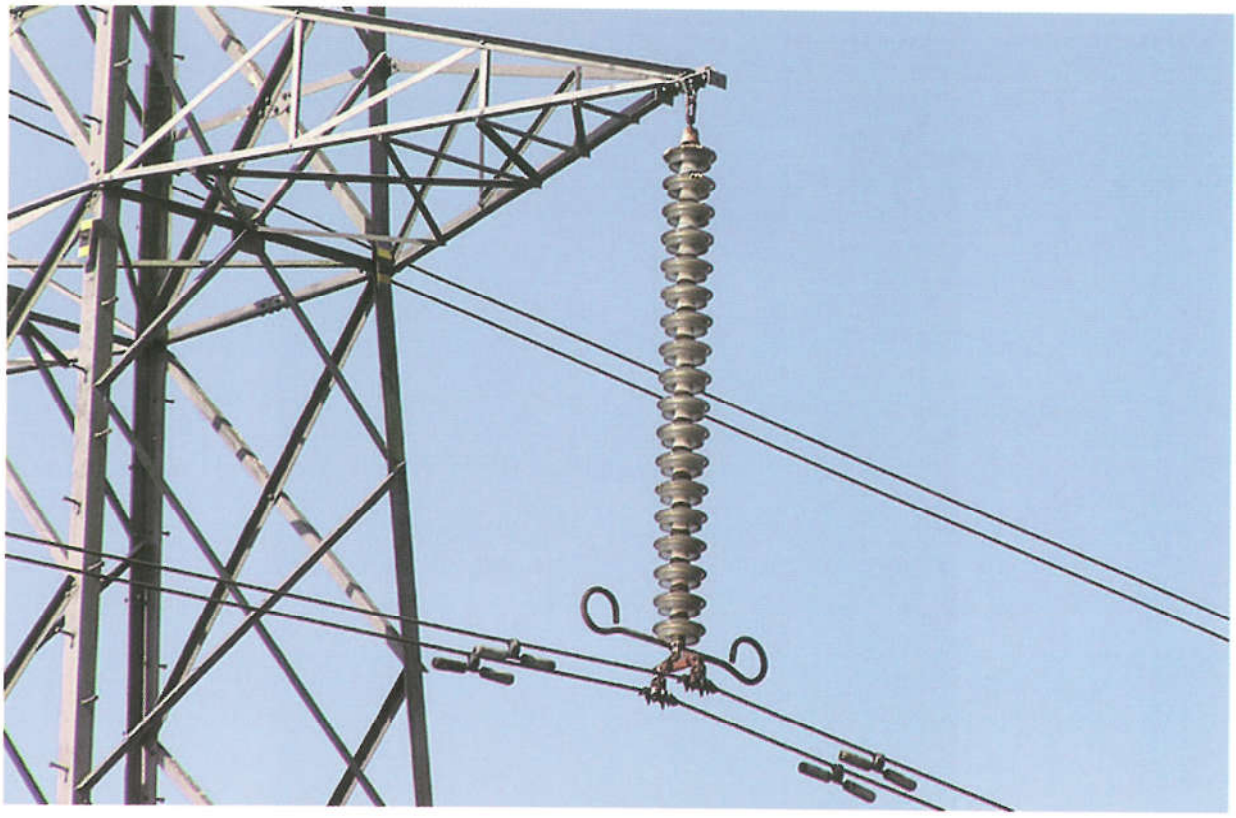
Ako bi trajno strujno opterećenje bilo preveliko za jedan vodič razumno velikog presjeka, primjenjuje se više vodiča u snopu. Naš vod napona 400 kV ima dva vodiča u svakoj fazi, a primjenjuju se i snopovi od više vodiča (tri, četiri).

Kao *zaštitno uže*[114] od atmosferskog električkog pražnjenja (udara munje) tradicionalno se koristi čelično pocinčano uže, a danas – sve češće – uže spleteno od žica koje imaju čelično srce i naneseni aluminijski plašt, zbog dobrih antikorozivnih i električkih svojstava. U najnovije doba, u jezgru zaštitne užadi smješten je vod iz *optičkih vlakana*[115], koji služi kao telekomunikacijski svjetlovodni prijenosni put.

Porodica korištenih *izolatora*[116] znatno je bogatija. U pogledu materijala, to su porculan, staklo i – za osobite potrebe – suvremeni sintetički materijali. U pogledu izvedbe: kapasti i štapni. Kapasti izolatorski članci (podsjećaju na tropski šešir – kapu!) slažu se u niz, *izolatorski lanac*[117], duljina kojega je određena naponom dalekovoda (slika 15.1). Radi onemogućenja približavanja konstrukciji stupa pri vjetru, ponekad se koriste dva lanca za jedno ovjesište vodiča, postavljena u obliku slova «V» (slika 15.2). Time izađe jeftiniji stup, jer može imati nešto užu glavu, ali se za vod utroši dvostruko više izolatora. Štapni izolatori

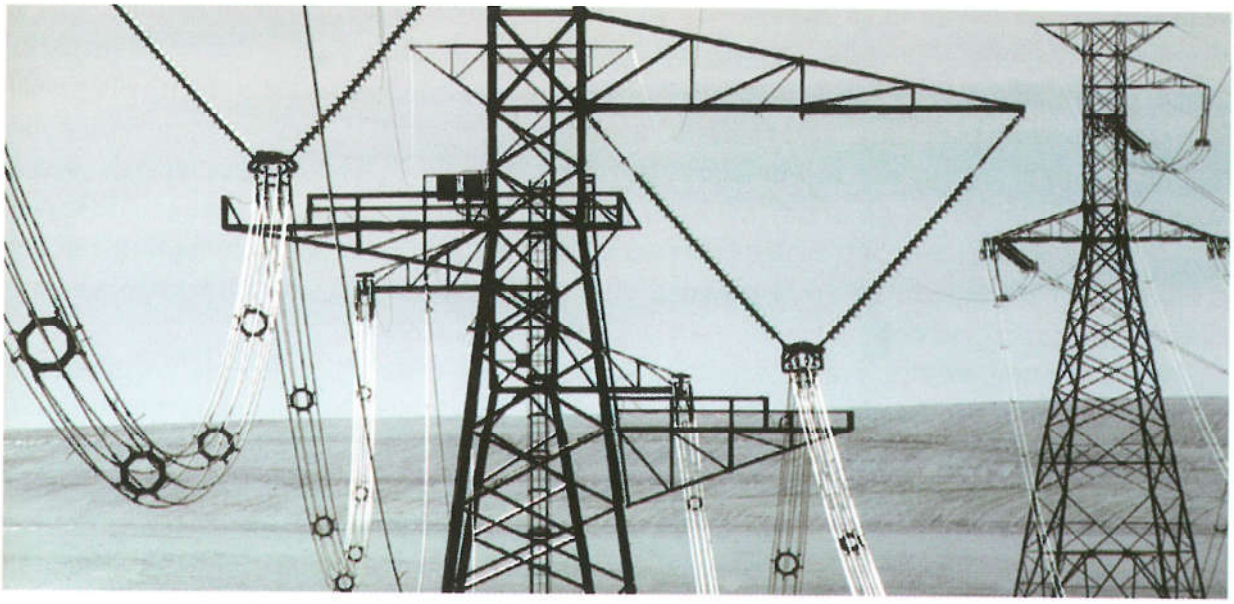
---

[111] earthing (engl. UK), grounding (engl. SAD), Erdung (njem.)
[112] phase conductor (engl.), Phasenleiter (njem.)
[113] Al/Č (hrvatska kratica), ACSR (engl.kratica), Al-St (njem.kratica)
[114] earth wire (engl.), Blitzschutzseil, Erdseil (njem.)
[115] To uže poznato je pod nazivom OPGW (optical power ground wire, engl.).
[116] insulator (engl.), Isolator (njem.)
[117] insulator string (engl.), Isolatorenkette (njem.)

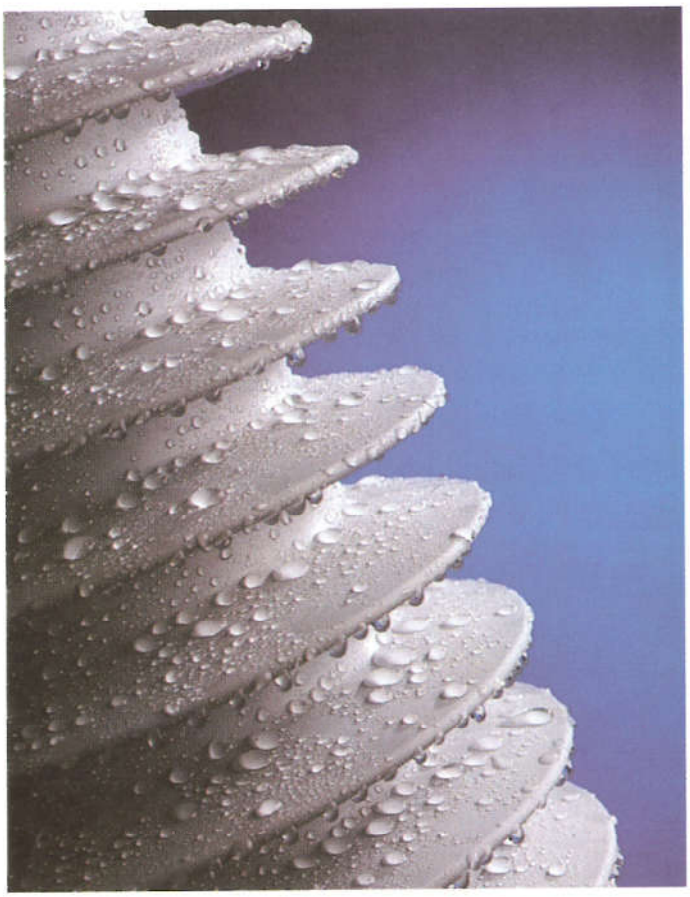


Slika 15.1. Izolatorski lanac 275 kV *u Engleskoj*

izrađuju se kao jedna cjelina za određeni napon. Obično tako da je jedan komad prikladan za vod napona 110 kV, niz od dva komada za vod 220 kV, a niz od tri komada za vod 400 kV. O prednostima nema konačnog stava, a ona najviše ovisi o dobrom domaćem isporučitelju. Primjerice, Nijemci primjenjuju štapne izolatore (iz porculana), a Francuzi kapaste (staklene).



Slika 15.2. Štapni izolatori u V-rasporedu i vodiči u osmerostrukom snopu



Slika 15.3. Kapljice vode ne prianjaju uz silikonski izolator

U svijetu brojnija je primjena kapastih izolatora; u nas oni su također isključivo rješenje za visokonaponske vodove.

Ovješenja izolatora mogu biti jednostruka ili dvostruka, eventualno višestruka. Jednostruko ovješenje stavlja se na stupove koji su u općem položaju prema svojoj okolini. Ako je ovješenje u rasponu gdje vodiči prelaze neko propisima utvrđeno mjesto (cesta, željeznička pruga, plovne rijeke, krov kakva industrijskog pogona, iznimno i iznad stambenih objekata i neki drugi mogući prijelazi), traži se na oba kraja takvog raspona ugradnja dvostrukih izolatorskih lanaca radi pojačane mehaničke sigurnosti ovješenja. Pukne li jedan izolator, vodič neće pasti na tlo, jer će ga držati preostali izolator (odnosno izolatorski lanac). Također, izvode se i električki pojačani izolatorski lanci, radi povećane otpornosti prema električnom preskoku; pri prenaponu na vodu preskoci će se usmjeravati na izolatore s nepojačanom izolacijom a otklanjati će se od izolatora s pojačanom izolacijom.

Danas sve naglašenije: svakovrsna zagađenja uvjetuju izolacijska rješenja sve otpornija u tom pogledu. Zanimljive su *kompozitne*[118] (kompaundne) izvedbe koje na površini imaju silikonsku gumu a u nutrini jezgru od staklenih vlakana, mehanički vrlo opteretivu. Na njih prljavština slabo prianja i kiša je lako pere, adhezijska sila između vode i silikonske površine malena je (slika 15.3). Koriste se i izvedbe od keramike ili stakla, ali vrlo složenog oblika, magleni izolatori. Ti su otporni na preskok unatoč tome što su im dijelovi površine i veoma onečišćeni (primjerice: posolicom).

[118] composite insulators (engl.)

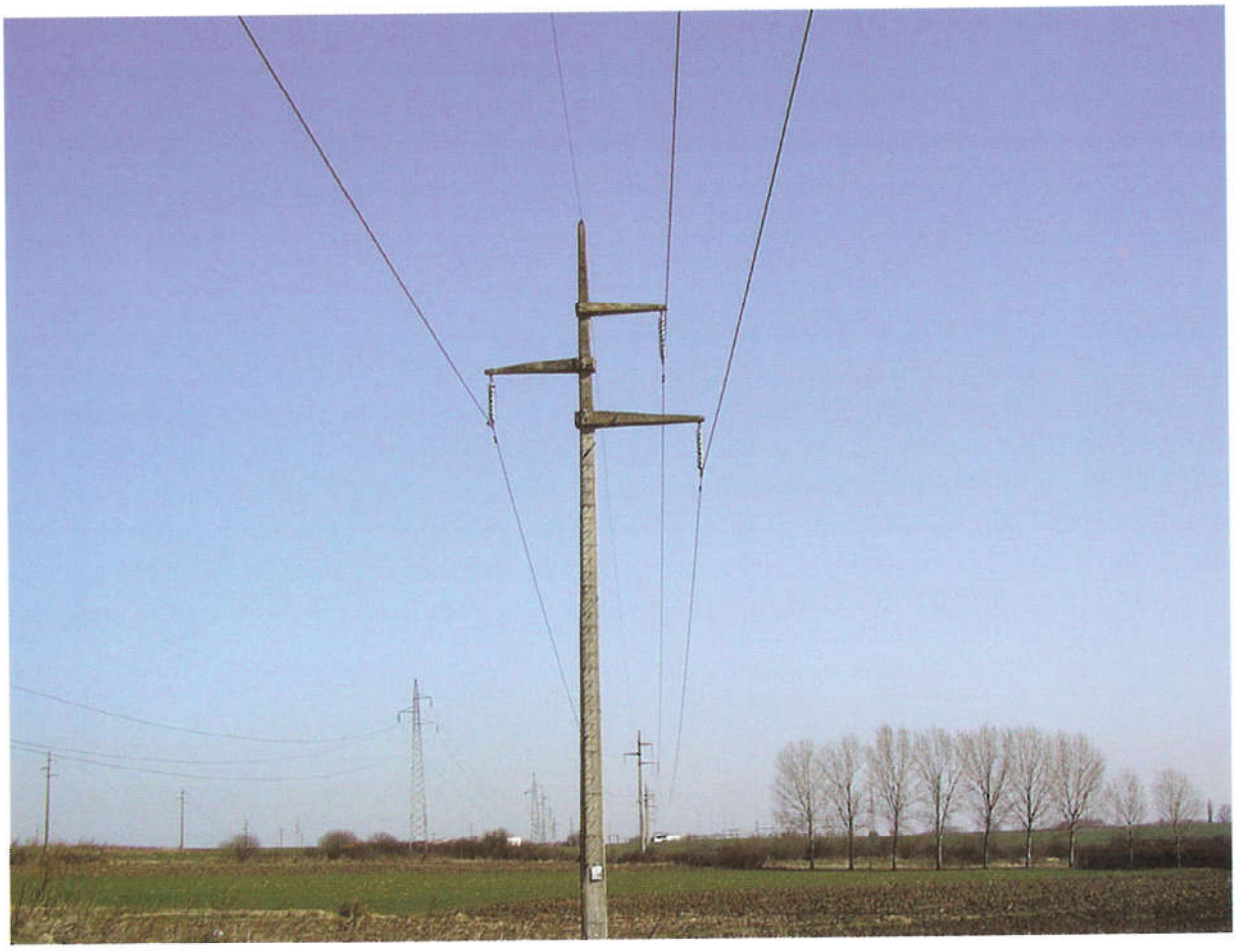
Spojna i nosiva oprema koja služi za ovješenje izolatorskog lanca i vodiča, te za električko nastavljanje vodiča, mora biti visoke mehaničke čvrstoće, dobre korozivne otpornosti i takva oblika i izvedbe da se na javlja električki proboj u neposredno dodirnutom zraku (korona). Zaštitna oprema služi povoljnijem oblikovanju raspodjele električnog polja oko izolatora i predstavlja namjerno postavljeno mjesto preskoka električnog luka, ako do takvog preskoka dođe u blizini izolatorskog lanca.

Stupovi – vrlo šarolika rješenja

Stupovi[119]! Nose vodiče trofaznog voda tako da osiguravaju razmak vodiča od tla i međusobno. Glava stupa je takva da je osiguran potreban razmak, kako između vodiča – tako i do najbližih dijelova konstrukcije stupa. Moraju podnijeti masu vodiča, izolatora, montera, leda i snijega. Moraju ostati stabilni kod pucanja vodiča i kod bočnog vjetra na vod propisano očekivane brzine. Ne smiju erodirati ni korodirati prebrzo. Moraju biti estetski podnošljivi te prikladni za montažu i na teško pristupačnim lokacijama. Konačno: ne smiju biti preskupi.

Slika 15.4. Drveni portalni stup na ratnom privremenom vodu 220 kV *u Slavoniji*

[119] pylon (engl. UK), tower (engl. SAD), Mast (njem.)

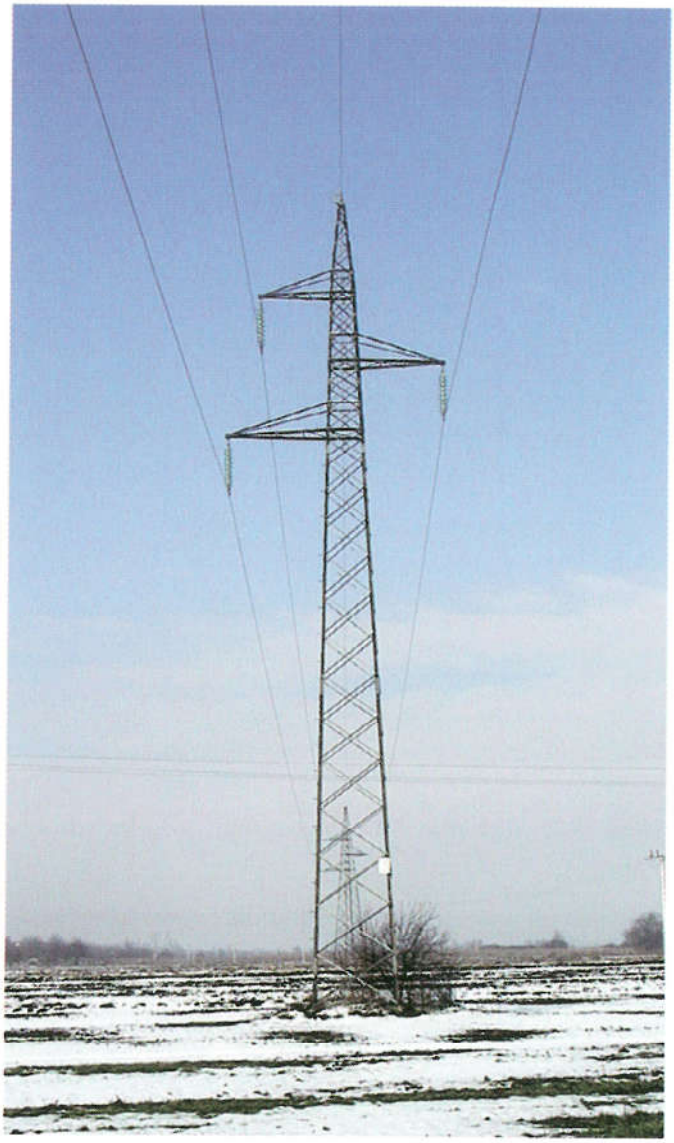


Slika 15.5. Betonski stup 110 kV *na slavonskom području*

Ni u čemu nije tolika šarolikost primjenjivanih rješenja kao kod stupova. Ne samo u svjetskom okviru, već i unutar-državnom. Mnogostrukost aspekata, uvjetuje – ovim ili onim naglaskom – izabrano rješenje. U pogledu materijala, to su: impregnirano drvo, beton i čelik (slike 15.4 do 15.6). U pogledu osnovne izvedbe, mogu biti: samostojeći i sidreni. Mogu nositi samo jedan trofazni vod, ali i više vodova: stupovi za dvostruke i četverostruke vodove (pak čak i za šesterostruke i osmerostruke vodove!). U zapadnoj Europi praktički se ne grade jednostruki vodovi, radi višestrukog iskorištenja jedne trase.

Danas su najčešći pocinčani čelično-rešetkasti stupovi, eventualno dopunski obojeni radi veće korozivne otpornosti i boljih estetskih karakteristika. Međutim, ne izbjegavaju se posve, kako rješenja od impregniranog drveta – tako i rješenja od betona odnosno kombinacije: stupovi od jednog iz ta dva materijala, a čelična konstrukcija prečke. Rešetkasti stupovi su uobičajeno sastavljeni iz elemenata kutnog profila (L-profil), no mogu biti i iz cijevnog profila ili I-profila.

Oblici stupa su najzanimljiviji. Osiguravaju, ponajprije, stanoviti raspored tri fazna vodiča: horizontalni, trokutni ili vertikalni. Horizontalni raspored vodiča ostvaruje se s najnižim stupovima, uz povećani horizontalni razmak među faznim vodičima koji sprečava nedopušteno približavanje tih vodiča prilikom njihanja zbog vjetra. Dakle, širina zauzete trase je povećana. Vertikalni raspored vodiča traži najviše stupove i veću visinsku udaljenost faznih vodiča, radi sprečavanja približavanja prilikom odskoka vodiča nakon što s

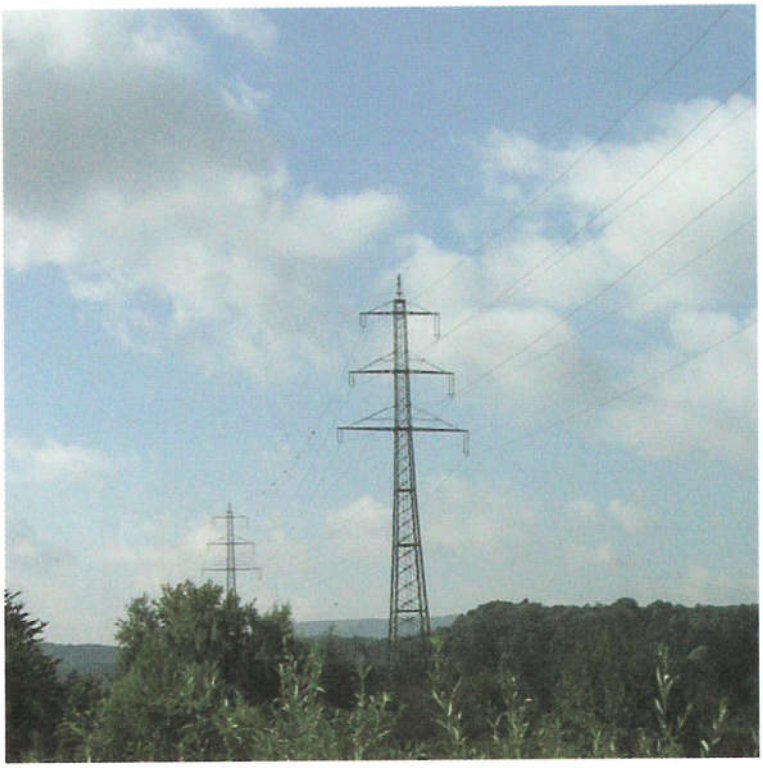


Slika 15.6. Čelično-rešetkasti stup tipa "jela" na slavonskom području

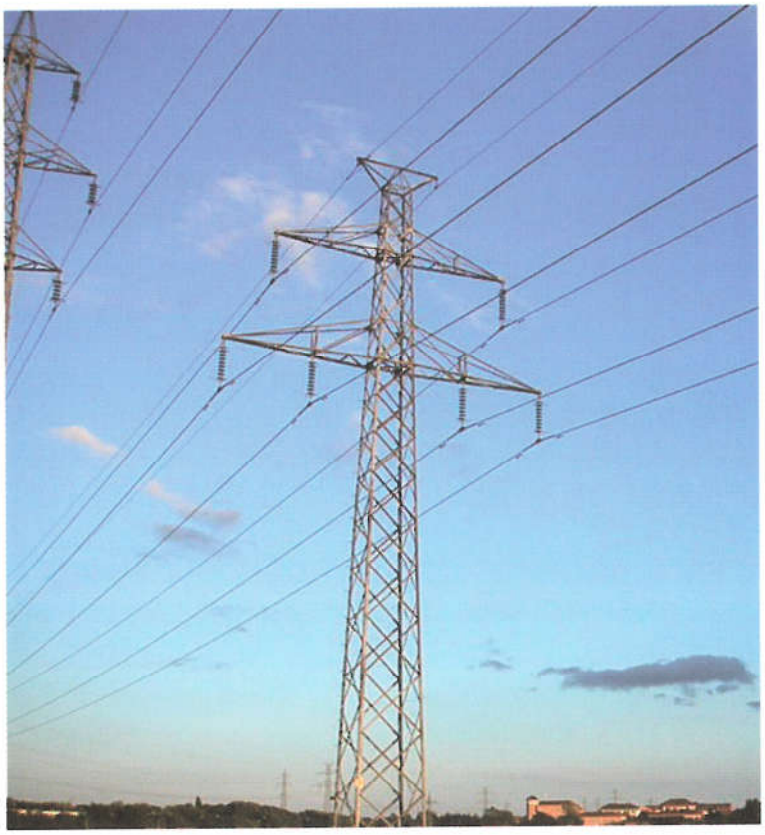
njega naglo padne sniježni ili ledeni nanos, ali traži užu širinu zauzete trase. Trokutasti raspored vodiča, što bliži jednakostraničnom, vodi simetriji induktivnog otpora svih faznih vodiča. Ne traži, dakle, izvedbu prepleta, koji je potreban na duljim vodovima s horizontalnim ili vertikalnim rasporedom vodiča, kako bi se izjednačili električki parametri sva tri fazna vodiča.

Trokutasti donekle nesimetričan raspored vodiča jednostrukog voda ostvaruje se uobičajeno stupovima tipa "jela" (slika 15.6). Toranj koji se blago ukošuje prema vrhu podsjeća izgledom na to drvo i – ako nije premasivan i preširoke osnove – možda se estetski *najprirodnije* uklapa u okolinu. "Dvostruka jela" je slična jednostrukoj, samo služi nošenju dva trofazna voda (slika 15.7). Modificirana "jela" ima skošenja trupa stupa do glave stupa, a u glavi stupa trup nije skošen, što omogućuje primjenu jednako dugih konzola.

Slični takav toranj može poslužiti i za nošenje dva trofazna voda, trokutastog rasporeda vodiča, tip "Dunav" (slika 15.8). Također, slični trup stupa služi i za nošenje dva ili četiri voda s kombiniranim rasporedom vodiča (slika 15.9).



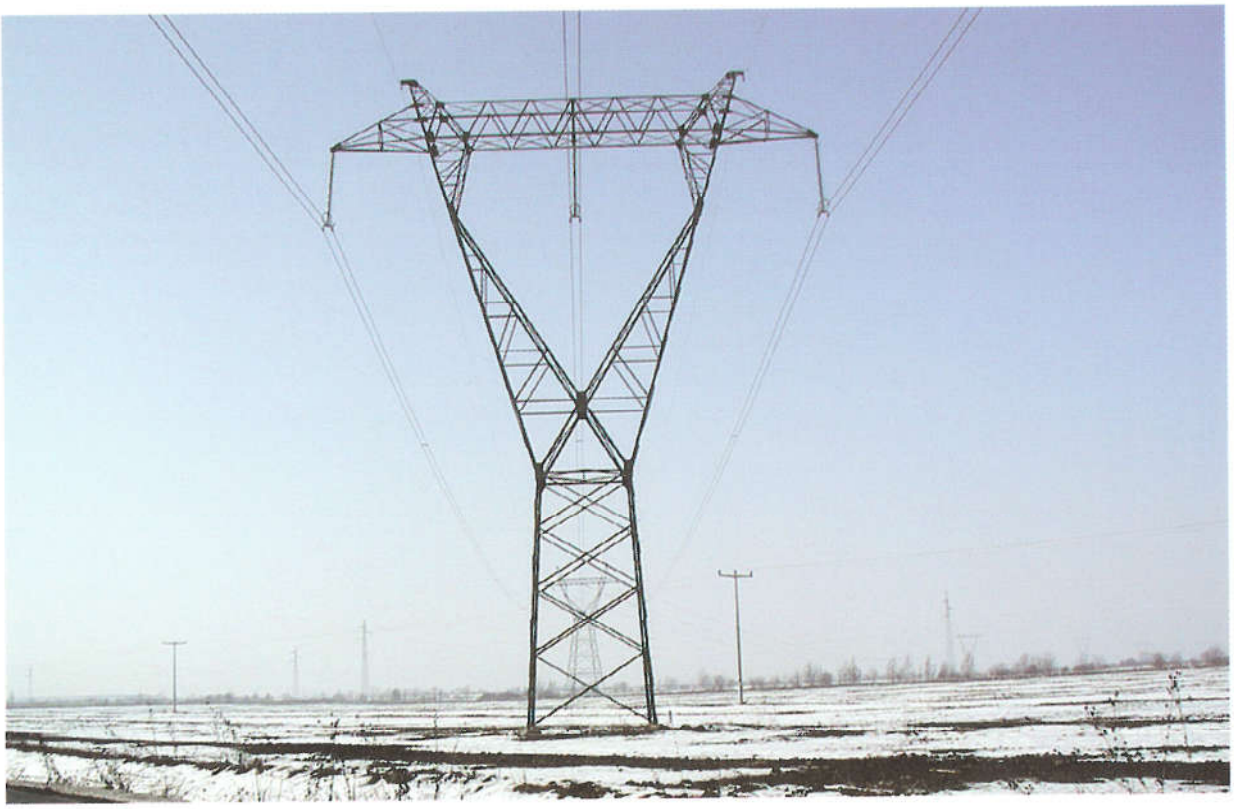
Slika 15.7. Stup tipa "dvostruka jela" u Luksemburgu



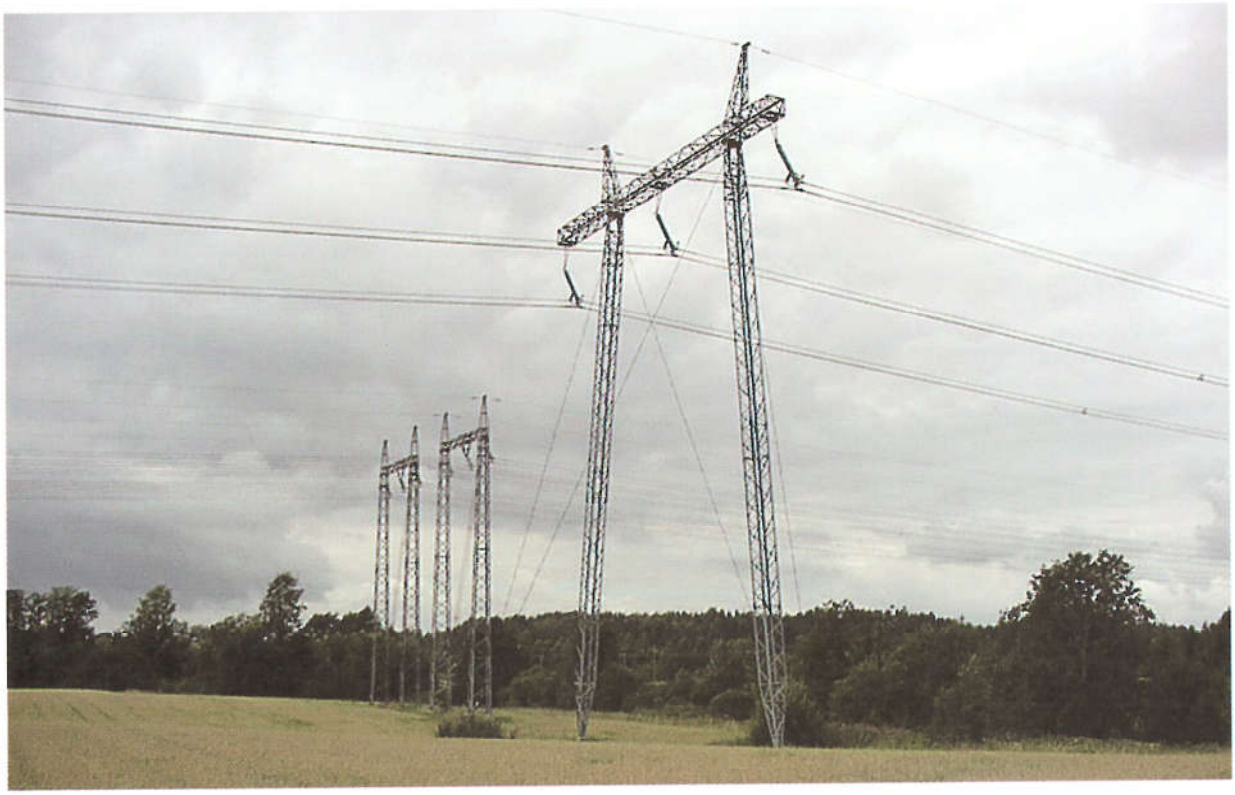
Slika 15.8. Stup tipa "Dunav" u Švedskoj

Slika 15.9. Dalekovod 2×380+2×110 kV *u Nizozemskoj*

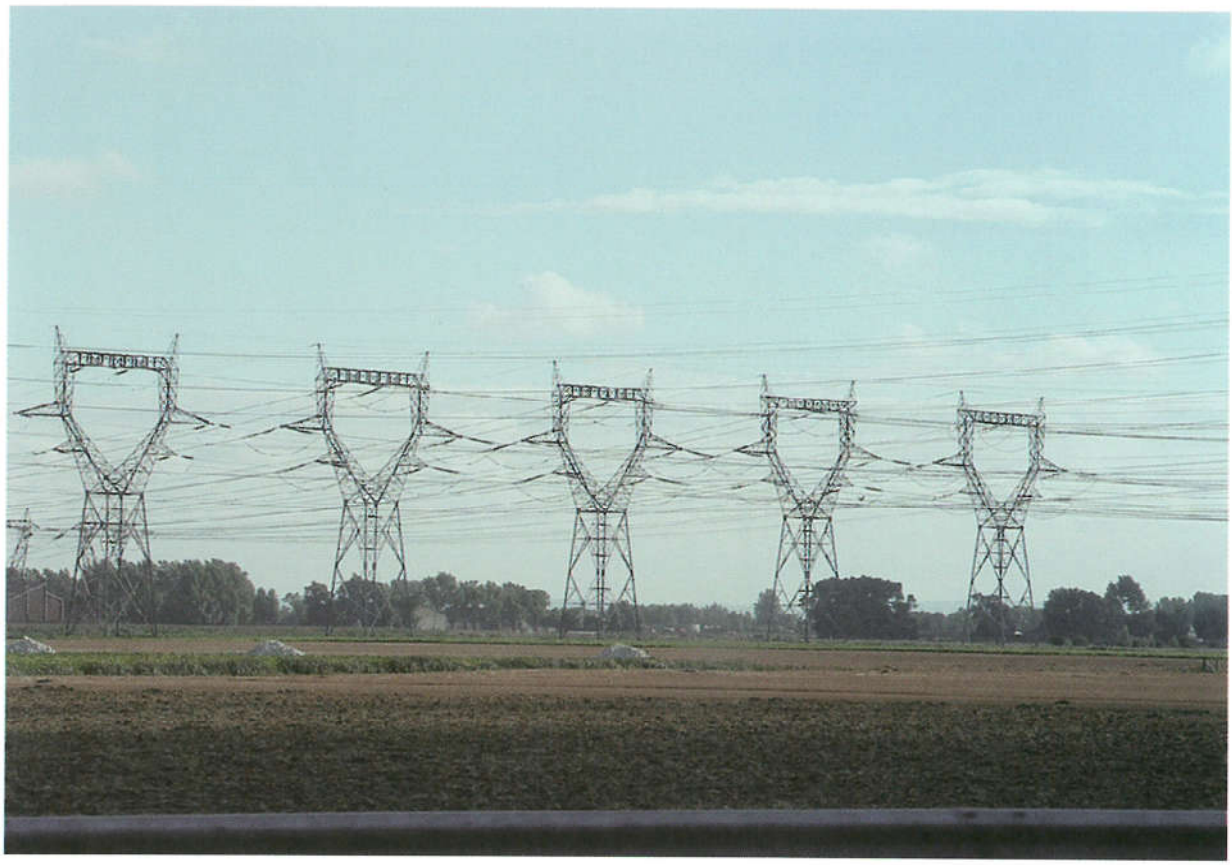
Slika 15.10. Stup tipa "bačva" u Engleskoj



Slika 15.11. Stup tipa "ipsilon" u Slavoniji



Slika 15.12. Portalni usidreni stup u Finskoj

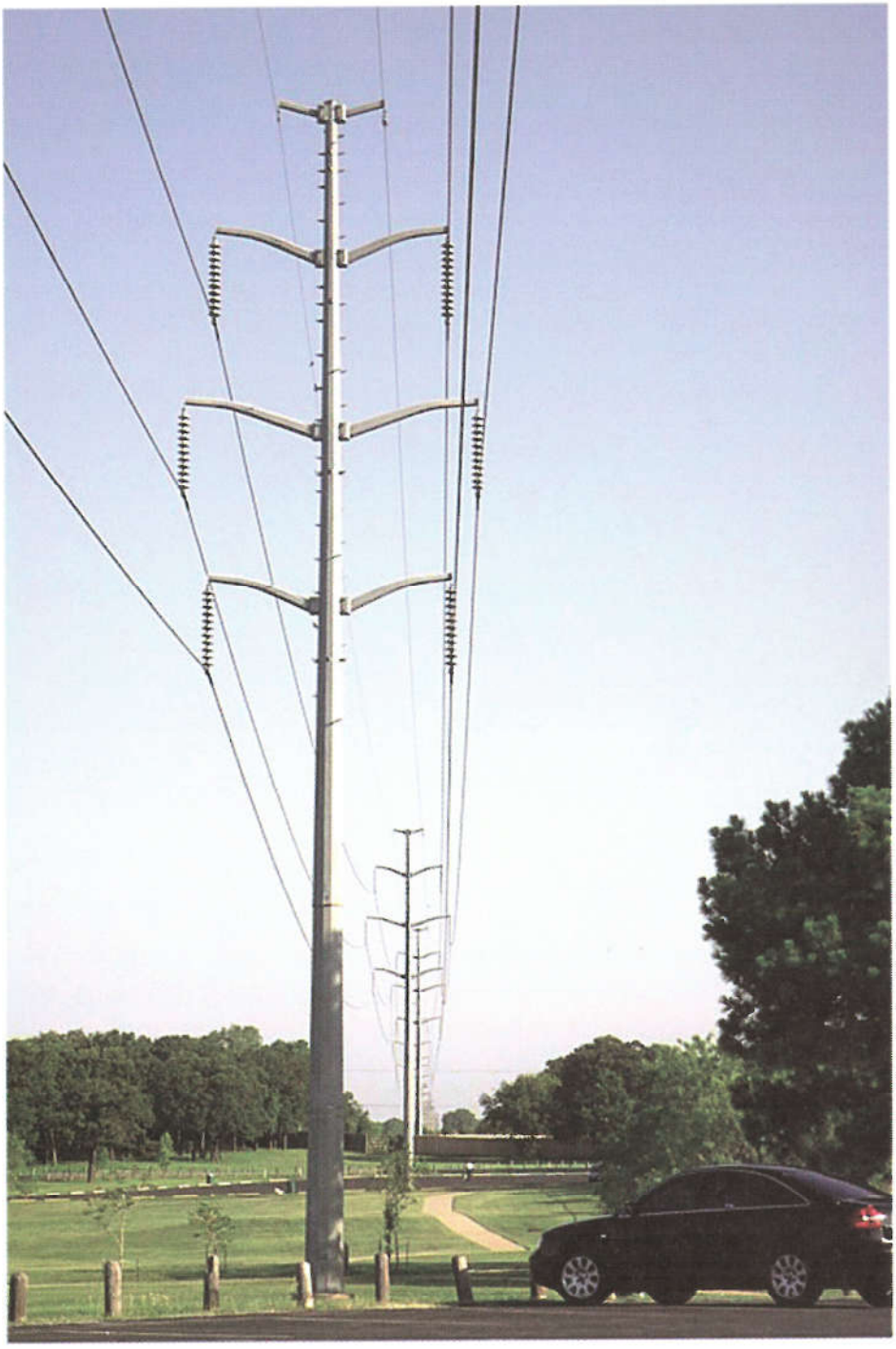


Slika 15.13. Stupovi tipa "mačka" kod Calaisa/Francuska

Poseban oblik je "bačva" kada su oba voda postavljena tako da su gornje i donje faze nešto manje, a srednje nešto više udaljene od trupa stupa. Zamišljene linije, povučene kroz ovjesišta vodiča, ocrtavale bi siluetu bačve (slika 15.10). Dovoljan je manji vertikalni razmak vodiča i time niži stupovi od stupova s vertikalnim rasporedom vodiča, jer su vodiči susjednih faza donekle izmaknuti po vertikali i time manje izloženi opasnom približavanju pri odskoku vodiča.

Za horizontalni raspored vodiča dolazi u obzir samostojeći stup tipa "ipsilon" (slika 15.11). Također i samostojeći portalni ili usidreni portalni stup (slika 15.12). Usidreni stup zauzima ukupno više prostora na stupnom mjestu i izložen je lakšem mehaničkom ugrožavanju, zbog sidrene užadi i mjesta sidrenja. Ukupno treba manje materijala i manje montažnih radnih sati na terenu. Samostojeći stup je nešto masivniji, zauzima manje prostora na stupnom mjestu, ali treba više radnog vremena za montažu na terenu. Ekonomski nije bitno drukčije i stoga nijedno rješenje nema apsolutnu prednost. Ako primjerice treba vod izgraditi hitno, prednost će imati sidreno rješenje jer će se najviše posla obaviti u tvornici, a efektivna izvedba preostat će na terenu. Čak se i tvornički zgotovljeni betonski temelji mogu dovesti na teren i tamo samo ukopati. I za trokutni raspored vodiča može se primjeniti usidreni stup tipa "igla", koji je oslonjen samo na jedan temelj i usidren pomoću četiri sidra.

Za donekle nepravilan trokutni raspored faznih vodiča jednostrukog ili dvostrukog voda s dva zaštitna užeta dolazi u obzir stup tipa "mačka", koji podsjeća na sjedeću mačku uzdignute glave (slika 15.13). Sličan je stupu "ipsilon", samo što ima izlomljenu siluetu grede, a ne ravnu.



Slika 15.14. Čelični cijevni stupovi u Teksasu/SAD

Stup ruskog dalekovoda 1150 kV je portalni u obliku slova V, usidren (slika 14.5). Prečka mu je na visini 40 metara od tla, a njezina duljina je nešto ispod 46 metara. Masa stupa je 17,8 tona. Jedan fazni snop sastoji se iz *osam* alučeličnih vodiča presjeka 330/43 četvorna milimetra. Izolatorski lanci sadrže 45 do 61 kapastog izolatora i dugi su 10 do 14 metara.

U najnovije vrijeme, za pristup dalekovoda u prigradske zone ili u osobito vrijedne prirodne ambijente, koriste se vitke, čelične, nerešetkaste konstrukcije, koje se estetski čine najelegantnijima (slika 15.14).

Kabelski vodovi

Dodajmo na kraju da se već dulje vrijeme za prijenos električne energije – pored nadzemnih vodova – koriste ipak i podzemni (donekle i podmorski) kabelski vodovi, ali samo radi *prodora* visokonaponskih vodova u urbanizirana područja velikih gradova te svladavanje manjih morskih prepreka (veće duljine kabela korištene pod izmjeničnim naponom ne dolaze u obzir, kao što je već rečeno)[120]. Premda bi praktički nikakvo estetsko-vizualno opterećenje okoline davalo prednost primjeni kabela pred nadzemnim vodom, ipak se kod visokonaponskih vodova u takva rješenja ide samo iznimno, zbog skupoće. Naime, visokonaponski kabel zna biti desetak puta skuplji od odgovarajućeg nadzemnog voda, pa bi njegova šira primjena bila ekonomski naprosto nerazumna.

Slika 15.15. Jednožilni kabel 420/√3 kV

Visokonaponski kabeli izvode se danas kao jednožilni, rjeđe trožilni. Izolacija im je umreženi polietilen[121] a vodiči izvedeni su iz bakra ili aluminija (slika 15.15). Nazivni linijski trofazni naponi, danas su posve uobičajeni do 170 kV, ali se već proizvode takvi kabeli do napona 550 kV. Tipičan kabel 110 kV, kakav se primjenjuje i u Hrvatskoj, je jednožilni s aluminijskim vodičem 1000 mm^2, dopuštene trajne strujne opteretljivosti oko 800 A, dakle trofazne termičke prijenosne moći oko 150 MVA. Prijenosna moć nešto je veća od moći tipičnog nadzemnog voda 110 kV u Hrvatskoj izvedenog vodičima Al/Č 240/40 mm^2, dopuštene trajne strujne opteretljivosti 645 A, dakle termičke prijenosne moći oko 120 MVA.

[120] Ovdje je riječ o kabelima korištenim uz izmjenični napon; o prijenosu visokonaponskim kabelima istosmjerne struje vidi poglavlje 23.

[121] To je tzv. XLPE-insulation (engl.), odnosno VPE-Isolierstoffe (njem.)

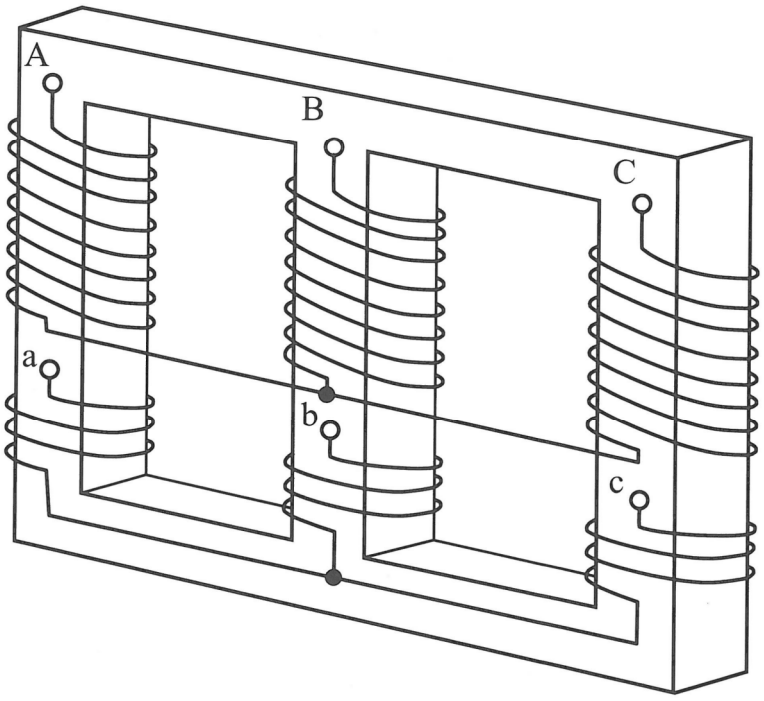
16

Transformatori

Radi boljeg sagledavanja razvojnog puta energetskih transformatora, koji su tehničko utemeljenje trofaznog prijenosa električne energije, iskažimo njihove veličine kakve se danas uobičajeno susreću u nas. U manjim mjestima, snaga transformatora na stupnim trafostanicama 10/0,4 kV je veličine 125 ili 250 kilovoltampera. Kabelske trafostanice u gradovima imaju transformatore od 400 i 630 kVA. Srednjonaponske trafostanice 35/10 kV imaju jedinice od 4 i 8 MVA. To su redovi veličina snaga uobičajenih za distribucijske mreže.

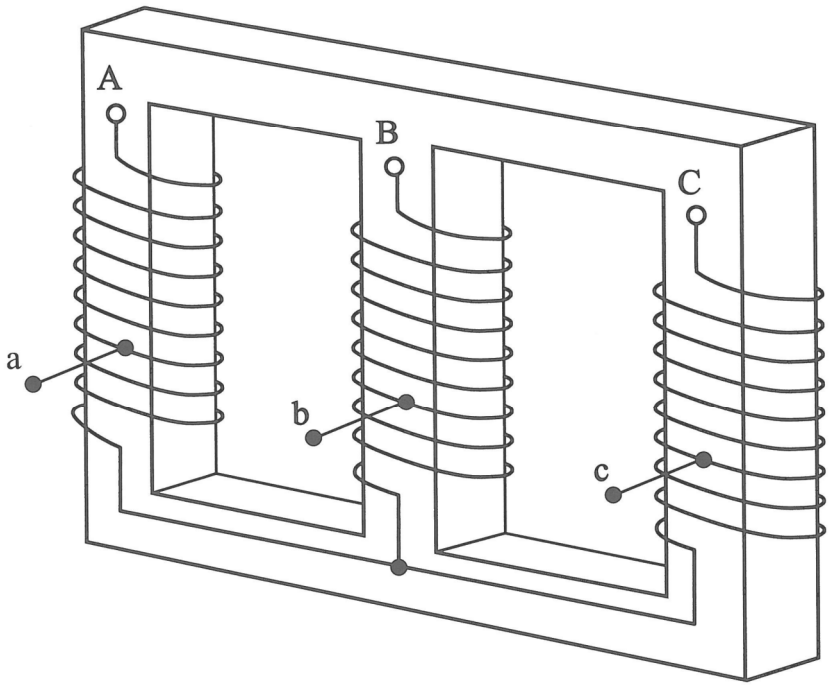
U hrvatskoj – današnjoj – prijenosnoj mreži, uobičajene su snage energetskih transformatora 110/35, 110/20 i 110/10 kV od 20 i 40, te najviše 63 MVA, transformatora 220/110 kV od 150 MVA, transformatora 400/110 kV od 300 MVA i transformatora 400/220 kV od 400 MVA. To su tzv. mrežni transformatori. Generatorski transformatori povezuju generatore u elektranama na mrežu i njihov je primarni napon određen naponom generatora (najčešće 10 ili 15 kV), sekundarni napon naponom mreže na koju su priključeni, a snaga je određena snagom generatora, odnosno elektrane.

Prema elektromagnetskoj izvedbi, transformatori mogu biti: s razdvojenim namotima (dvonamotni, tronamotni) i u izvedbi autotransformatora, sa serijskim i paralelnim dijelom namota. Dvonamotnom (dakako: dvonamotnom u svakoj fazi trofaznog transformatora) transformatoru, omjer broja zavoja primarnog namota prema broju zavoja sekundarnog namota određuje omjer primarnog i sekundarnog napona (slika 16.1). Autotransformator (transformator u štednom spoju) je jeftiniji, primjenjuje se ako primarni i sekundarni napon nisu previše različiti, jer on galvanski ne razdvaja mreže na koje je primarno i sekundarno



Slika 16.1. Trofazni dvonamotni transformator

priključen. Na strani višeg napona ima namot s određenim brojem zavoja a niženaponsku stranu tvori odgovarajući dio tog istog namota (slika 16.2). U trofaznom transformatoru, primarni i sekundarni fazni namoti mogu biti među sobom spojeni u zvijezdu, trokut ili u tzv. cik-cak spoj.



Slika 16.2. Trofazni autotransformator

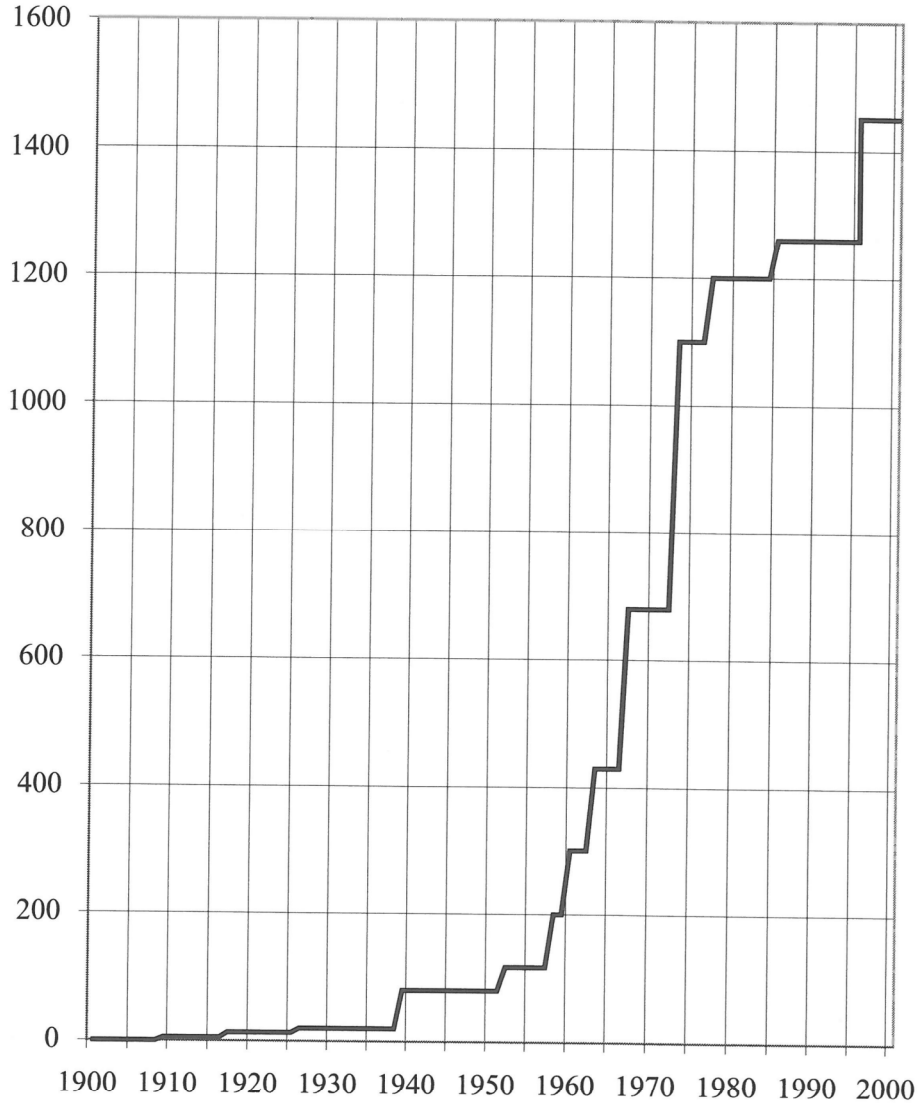
Prema promjenjivosti prijenosnog omjera, transformatori se izvode kao: neregulacijski transformatori i to s nepromjenjivim prijenosnim omjerom i s premjestivim prijenosnim omjerom u beznaponskom stanju, te regulacijski transformatori sa (stupnjevitom) regulacijom prijenosnog omjera pod opterećenjem. 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[122] (kada se djeluje na veličinu i fazni pomak sekundarnog napona).

Današnje granične svjetske mogućnosti izrade transformatora su oko 1500 kV u pogledu gornjeg napona i oko 2000 MVA u pogledu nazivne snage (slika 16.3). Kako smo do toga došli?

Prvi trofazni transformatori bili su suhi, s početka devedesetih godina pretprošlog stoljeća. Snaga im je bila nekoliko stotina kilovoltampera (današnji manji distribucijski transformatori). Povećanje snage omogućila je primjena željeza legiranog silicijem za izradu magnetskih jezgri transformatora, te primjena izolacijskog ulja kao komponente za izolaciju i istodobno sredstva za odvođenje topline iz aktivnih dijelova transformatora.

Ključni dijelovi transformatora su: magnetska jezgra, namoti s izolacijom – što predstavlja aktivni dio transformatora, uronjen u izolacijsko ulje smješteno u kotao transformatora. Kotao je povezan sa sustavom za hlađenje transformatora. Kod transformatora velikih snaga i/ili vrlo visokih napona važna je komponenta i provodni izolator kojim se ostvaruje prolaz električnog priključka u kotao transformatora.

[122] phase-shifting transformer (engl.)



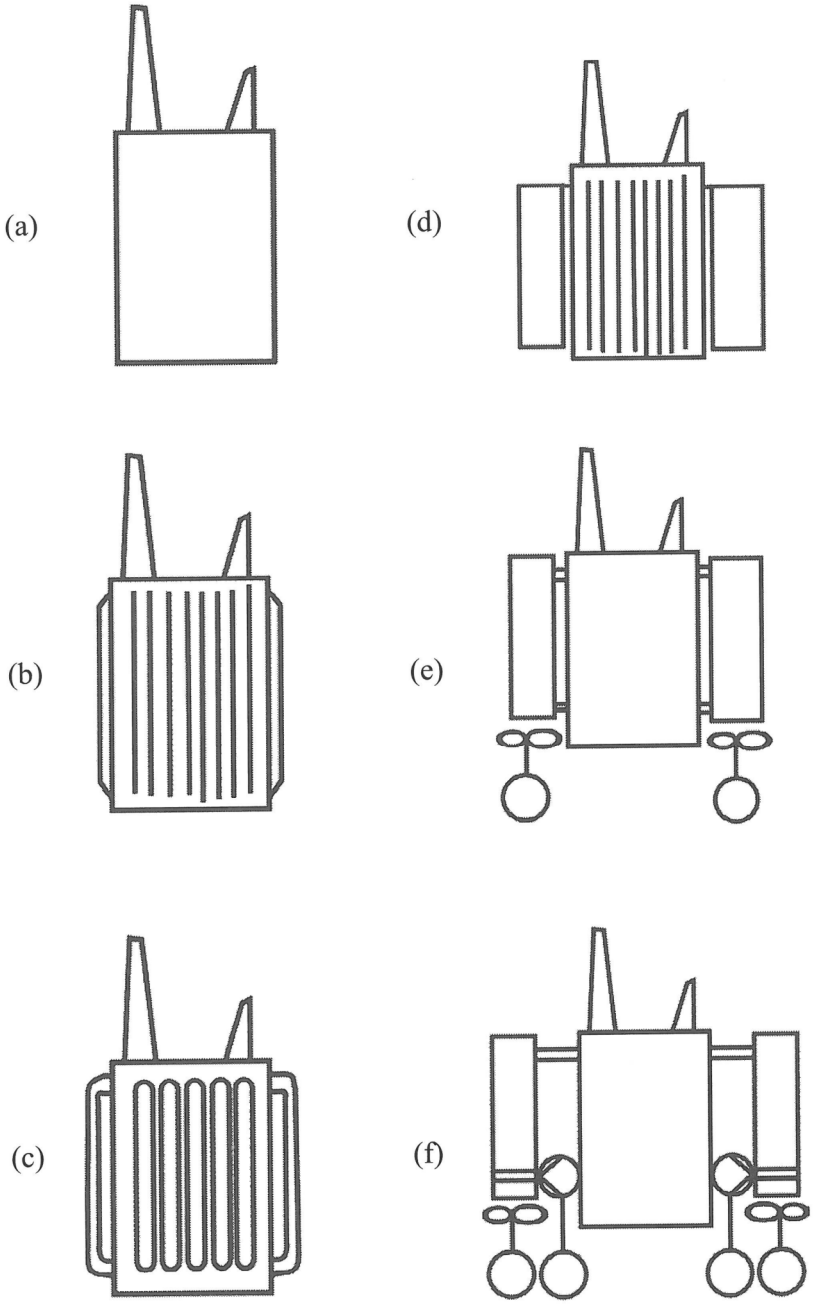
Slika 16.3. Snage trofaznih transformatora jednog svjetskog proizvođača (MVA)

Nastojanje pri konstruiranju transformatora neprekidno je usmjereno u pravcu što manjeg utroška materijala po jedinici njegove snage, uz osiguranje potrebne naponske čvrstoće njegove izolacije (ta izolacija je, zbog velikih tlačnih sila koje se javljaju među zavojima namota transformatora, najugroženija pri kratkom spoju transformatora, a električki je ugrožavaju prenaponi u mrežama na koje je transformator priključen), prihvatljive životne dobi transformatora (koja je uvjetovana zagrijavanjem, ponajprije izolacije transformatora), te povoljne ekonomičnosti (koju određuje veličina gubitaka električne energije u transformatoru, potrošak njegovih pomoćnih uređaja – crpki i/ili ventilatora u sustavu hlađenja i amortizacija cijene transformatora).

Što je magnetska jezgra manja, to će i čitav transformator biti manji. Jezgra će biti manja ako je dopuštena veća gustoća magnetskog toka u njoj. Uz veću gustoću, veći su gubici u željezu te su oni u transformatoru smanjivani primjenom legiranog željeza sa silicijem, izradom jezgre od tankih limova (debljine oko 0,3 milimetra), danas izoliranih veoma tankom fosfatnom izolacijom, tako da je aktivno zauzeće prostora što potpunije. Limovi, a ne masivne jezgre, moraju

se primjeniti stoga da bi bio što uži strujni put za vrtložne struje koje se javljaju u jezgi zbog neželjena induciranja napona u njoj. Od početka četrdesetih godina prošlog stoljeća primjenjuju se magnetski orijentirani limovi koji u smjeru uspostavljanja magnetskog toka imaju smanjene gubitke, uz veliku gustoću magnetskog toka. Super-orijentirani i laserski rezani limovi imaju danas gubitke manje od pola vata po kilogramu, dok je prvi upotrebljavani materijal imao gubitke oko četiri vata po kilogramu. Ostvareno je deseterostruko poboljšanje u 100 godina razvoja!

Čitav transformator bit će manji ako je izolacija za određeni napon tanja. U pogledu materijala vodiča za namote, nije u razvojnom putu dolazilo do promjena – primjenjuje se bakar. Oblikovanje i sekcioniranje njegova presjeka omogućuje povoljnije hlađenje i odgovarajuće



Slika 16.4. Načini hlađenja transformatora

elektrotehničke karakteristike namota. Najprije je žica bila izolirana pamukom, da bi se za povećane struje prešlo na papirnu izolaciju uronjenu u izolacijsko ulje. Papir za najviše zahtjeve je specijalistički proizvod koji je veoma osjetljiv u pogledu tehnologije i sirovine. Najpoznatiji europski proizvođač transformatorskog papira dobavlja kao sirovinu isključivo jednu vrstu drveta iz Švedske, za koje je karakteristična paralelnost i cjelovitost vlakana velike duljine.

Transformatorsko ulje je mineralno. Derivat je nafte. Papir uronjen u takvo ulje ima veliku probojnu električnu čvrstoću i nije podložan uvlačenju vlage, osim u mjeri u kojoj se to odvija u ulju.

Čistoća je važan faktor osiguranja kvalitete pri izradi izolacije, namota i montaže transformatora. U tvornici "Weidmann"/Švicarska kažu da bdiju nad svakom stranom molekulom pri proizvodnji transformatorskog papira, a veliki natpisi u svakoj hali obavještavaju o imenu i prezimenu osobe koja je odgovorna za čistoću hale i ovlaštena za izvršna naređenja u pogledu njezina očuvanja. U hali, u kojoj se u Tvornici transformatora ABB u Ludviki/ Švedska izrađuju namoti za transformatore, pod je obojen bijelo, radna odjeća je bijela, prije ulaska radnici obuvaju posebne bijele papuče, a ulaz posjetiteljima nije dopušten (samo je dopušten pogled kroz staklo).

Zanimljiv je razvoj sustava za hlađenje uljnih energetskih transformatora (slika 16.4). Za snagu od oko 10 kilovoltampera, toplina se može uspješno predati okolnom zraku ravnim limenim stanicama kotla (a). Da se poboljša odvođenje topline transformatora reda od oko 100 kilovoltampera, potrebno je stranice kotla izraditi od valovitog lima – rebra povećavaju površinu koja je u kontaktu sa zrakom (b). Za snage oko tisuću kilovoltampera potrebno je daljnje povećanje površine: dodaju se prigrađeni cijevni (c) ili rebrasti radijatori (d) koji su vertikalno protočni za ulje. Javlja se termosifonsko strujanje: toplo ulje dolazi odozgo u radijatore, da bi se hladnije spuštalo dolje i ulazilo u kotao te se opet zagrijavanjem u aktivnom dijelu transformatora dizalo u gornje zone. Zrak duž radijatorskih površina struji, istim prirodnim načinom, u suprotnom smjeru. Daljnje poboljšanje hlađenja je ubrzanje strujanja vanjskog zraka, dodavanjem ventilatora na pogodna mjesta uz radijatore (e). Takvo se rješenje primjenjuje na transformatorima reda veličine snage od 10 megavoltampera. Za najveće transformatore, snage od više desetaka megavoltampera, dodaju se uljne crpke, koje dovode i do prisilnog strujanja ulja u transformatoru, uz prisilno strujanje zraka izvan transformatora, ostvareno ventilatorima (f). Nužnost toga jasna je kada se ima na umu da su ukupni gubici u transformatorima najvećih snaga nekoliko megavata!

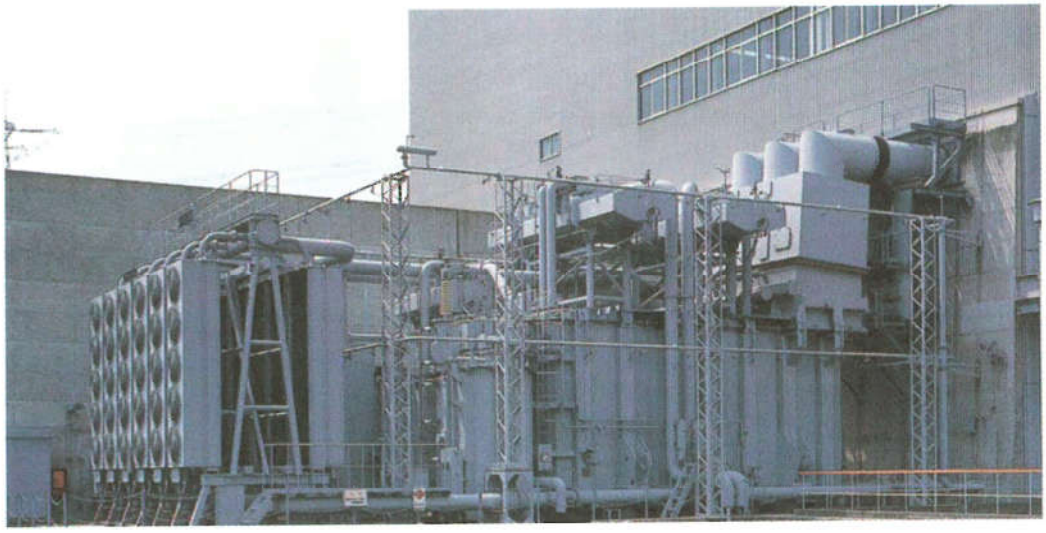
U povijesti razvoja transformatora presudno je bilo prvih deset godina prošlog stoljeća. Primjena legiranog lima radi smanjenja gubitaka, primjena uljno/papirne izolacije, izrada kotla od valovitog lima, primjena konzervatora za eliminiranje neposrednog kontakta s okolnim zrakom, kondenzatorski provodni izolatori – sve je to riješeno u tom vremenu.

Poznati uređaj za zaštitu uljnih transformatora od istjecanja ulja, Buchholzov relej, primjenjuje se od 1924. godine. Regulacijske sklopke, koje omogućuju promjenu prijenosnog omjera transformatora pod opterećenjem, su od 1927. godine.

Zbog masovne upotrebe distribucijskih transformatora, svaka industrijski razvijena zemlja nastoji ih proizvoditi. Međutim, energetske transformatore najviših napona i graničnih snaga proizvodi samo uži krug svjetskih proizvođača. Granične snage određuju potrebe – to su praktički jedinične snage generatora, dakle, danas oko 1600 MVA. Granične mogućnosti određivat će transportne okolnosti. Željezničkim transportom može se provoziti teret od oko 500 tona (k tome još i odgovarajuće oblikovan, u tzv. željezničkom profilu), a cestovnim i brodskim, danas, oko 800 tona. Stoga se transformatorske jedinice najvećih snaga ne

Slika 16.5. Trofazni transformator, 300 MVA, 400 kV

izvode kao trofazne nego jednofazne, te se tri komada spoje u trofazni slog. Transformator od 1000 MVA ima transportnu masu od oko 500 tona, a od 2000 MVA imat će transportnu masu od oko 800 tona – dakle kod najvećih transformatora upravo je granica trofazne i jednofazne izvedbe. Slog tri jednofazne jedinice je dakako skuplji od trofaznog rješenja za istu trofaznu snagu, no primjenjuje se i u nižem području snage, ako se želi jeftinije osigurati rezerva. Četiri izrađene jednofazne jedinice s ukupno 133 posto snage imaju jednaku redundanciju (zalihost) kao dvije trofazne jedinice kojima je ukupna snaga 200 posto. U oba slučaja, kada je jedna fizička jedinica u kvaru ili remontu, preostaje 100 posto snage za pogon.



Slika 16.6. Trofazni transformator 1260 MVA, 515 kV

17

Visokonaponski prekidači

Energetski transformator je u trofaznoj prijenosnoj mreži ona jedinica u kojoj se električna energija s jedne naponske razine pretvara u električnu energiju na drugoj naponskoj razini. Visokonaponski dalekovod omogućuje prijenos velikih količina električne energije na potrebne udaljenosti.

Ključna komponenta prijenosne mreže je visokonaponski *prekidač*[123]. Njime se izvode sklapanja u mreži: uključivanja i isključivanja. Prekidač to mora omogućiti i pri najvećim strujama koje se mogu pojaviti; u slučaju kratkog spoja u mreži, kada uređaji električne zaštite upravo prekidaču daju nalog za isključenje, da se kvarni dio mreže odvoji od preostalog. Druga električna veličina, kojoj je prekidač izložen, jest napon koji se javlja prilikom njegova sklapanja. Taj je napon u pravilu veći od pogonskog napona, jer je sklapanje prirodno praćeno pojavom prenapona, kojeg najveća vrijednost može biti i više nego dvostruko veća od najveće vrijednosti pogonskog napona.

Svaki prekidač ima metalne kontakte, koji u zatvorenom položaju tvore dobar električki spoj. Prikladnim mehanizmom kontakti se mogu otvoriti, čime se prekida struja koja njima teče i razvija električni luk. Proces isključenja je uspješno dovršen kada su kontakti razdvojeni, a luk ugašen.

Visokonaponski prekidači ne daju se načiniti tako da bi se kontakti razdvajali u zraku, pri normalnim okolnostima u atmosferi. Tako se izvode niskonaponski prekidači. Kod visokonaponskih isključenja, napon između otvorenih kontakata je prevelik da bi se ugasio električni luk. Stoga se poseglo za takvom tvari koja bi dovođenjem u prostor rastvorenih kontakata omogućavala gašenje električnog luka, zbog karakteristika te tvari i njezina prikladna strujanja.

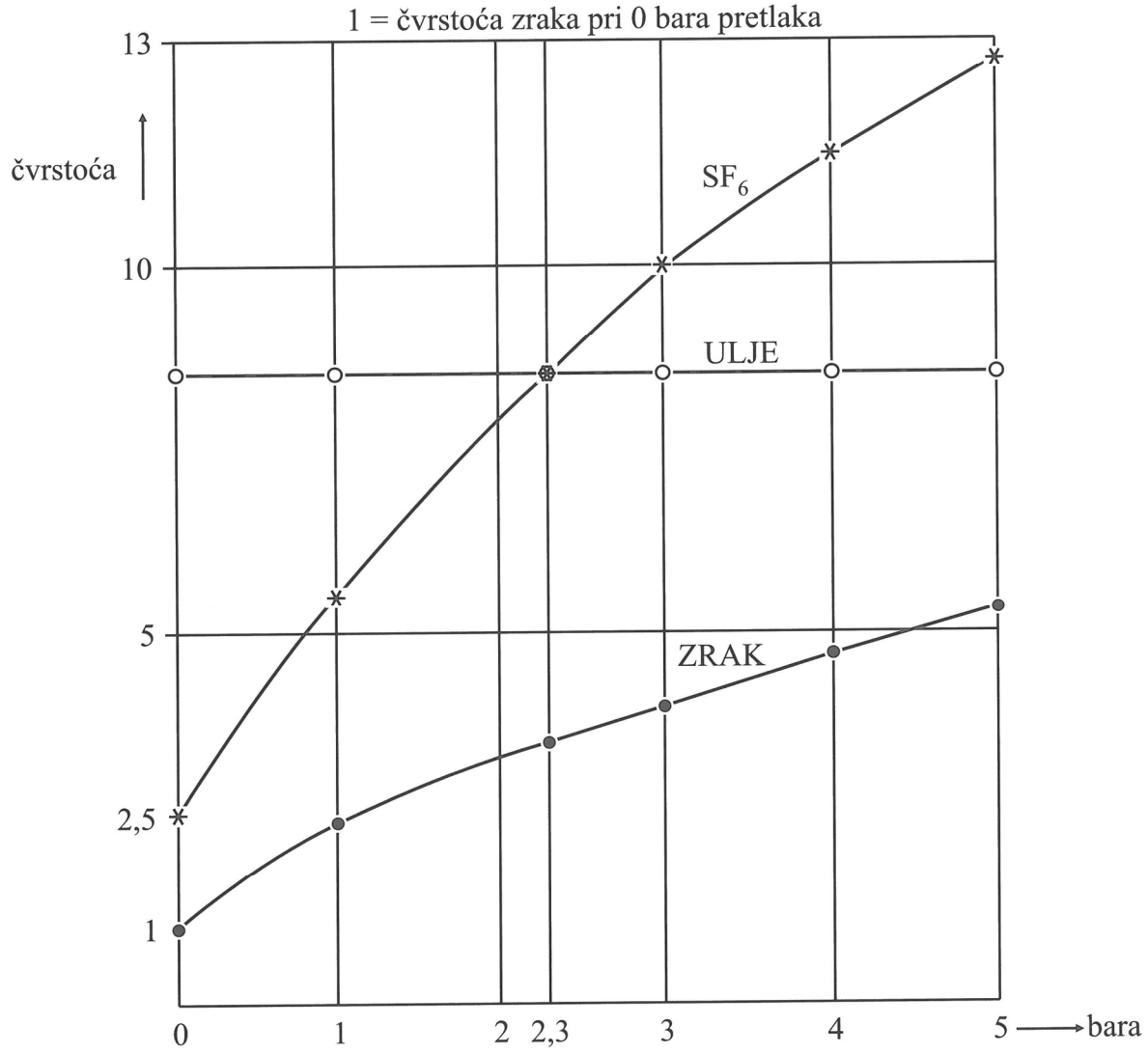
Godine 1895. konstruiran je prvi takav visokonaponski prekidač u kojem su kontakti uronjeni u posudu s velikim sadržajem ulja.

Pri razdvajanju, visoka temperatura električnog luka preobražava najbliže uljne zone u plazmu. Vodik, koji bitno preteže u sastavu ulja, ima znatno veći otpor prema održavanju luka od zraka i to je temelj tih prvih prekidača. Što je veći tlak sredstava za gašenje luka, to je veći intenzitet gašenja. Pri većoj struji isključenja tlak i količina isplinjenog ulja su veći, te takav prekidač može imati veće neprilike pri isključenju vrlo malih struja nego pri razumno velikim strujama. Mane takvih uljnih prekidača, opasnost od eksplozije – jer pri isključenju raste tlak u kotlu, potreba česte izmjene velike količine ulja (sagorjele čestice!) i veliki gabariti prekidača, dovele su do znatno poboljšanog nasljednika: malouljnog prekidača.

U njemu je vodik nastao razlaganjem ulja na temperaturi električnog luka, ali iz veoma male količine ukupno sadržanog ulja. Posebno oblikovana izolacijska komora s nizom kanala i otvora, u kojoj se nalaze kontakti, omogućuje da se putanja električnog luka izlomi, a poprečno na nju ostvaruje se strujanje ulja koje dolazi iz hladnih zona. Sklopni element je manja izolacijska posuda otvorena prema okolini, pa nema opasnosti od eksplozije. Takav prekidač u primjeni je od sredine 30-tih godina prošlog stoljeća, a još se i danas proizvodi. Glavna današnja mana je potreba česte i redovite zamjene ulja.

Kako i voda sadrži 2/3 vodika, to je bio temelj za razvoj prekidača u kojem je voda (s dodatkom sredstava protiv smrzavanja) sredstvo za gašenje luka. To su hidromatski prekidači,

[123] circuit-breaker (engl.), Leistungsschalter (njem.)

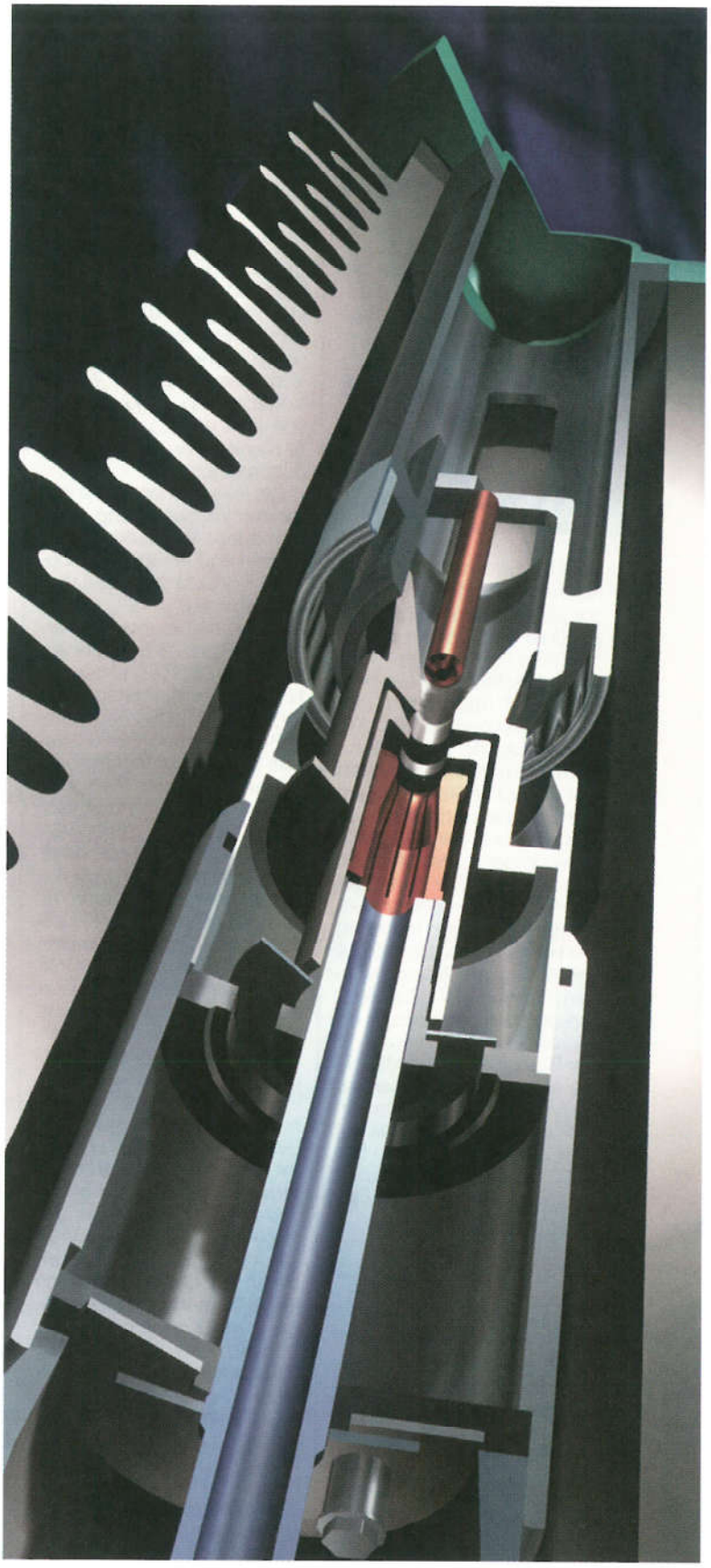


Slika 17.1. Dielektrička čvrstoća zraka, ulja i sumpor-heksafluorida u ovisnosti o pretlaku

primjena kojih je ostala u području srednjeg napona (do 60 kV). Glavna mana je električna vodljivost vode; pri razdvojenim kontaktima i ugašenom luku, prekidačem teče (doduše mala) struja koju treba isključiti dodatnim rastavljačem. Veliki su im gabariti.

Mane uljnih prekidača – sposobnost gašenja luka razmjerna veličini struje koju isključuju, problemi s isključivanjem malih struja i požarna opasnost pri havarijama takvih prekidača – dovele su do konstrukcije prekidača koji te mane nemaju: pneumatskih prekidača (prekidača sa stlačenim zrakom).

Električni luk dobro se gasi i u slučaju da je među otvorenim kontaktima zrak, ali na povećanom tlaku – između 15 i 30 bara. Manje od toga je nedovoljno, a više od toga naglašava probleme brtvljenja u pneumatskoj instalaciji i njezine čvrstoće radi otpornosti prema eksploziji. Kompromirani zrak ostvaruje se posebnim kompresorom – nema više cikličke zamjene ulja, zrak je raspoloživ posvuda, no treba neprekidno trošiti električnu energiju za pogon kompresora, a stlačeni zrak mora biti pouzdano suh. Treba imati i spremnike za zrak, kako zastoj kompresora ne bi onemogućio rad prekidača. Gašenje luka neovisno je o veličini struje prekidačem. Pneumatski prekidači u primjeni su od početka 30-ih godina prošlog stoljeća.



Slika 17.2. Presjek sklopne komore SF_6-prekidača

Slika 17.3. Sumpor-heksafluoridni prekidač 110 kV

Za plin sumporov heksafluorid (SF_6) utvrđeno je da ima potrebne karakteristike za gašenje luka pri tlaku nekoliko puta nižem od tlaka zraka; dovoljno je manje od 5 bara. (slika 17.1). To bitno utječe na jednostavnije brtvljenje i manje dimenzije pomoćne instalacije. Prekidač sa sumporovim heksafluoridom, razvijen 60-tih godina prošlog stoljeća, ima sve dobre karakteristike pneumatskog, a jednostavniji je za izradu. U pogonu ima potrebu dobavljanja plina SF_6 (to nije zrak kojeg ima posvuda), ali u neusporedivo duljim ciklusima nego li je to kod ulja za malouljne prekidače (slike 17.2. i 17.3).

Šezdesetih godina prošlog stoljeća pojavio se i jedan potpuno nov prekidač, s kakvim je eksperimentirano već dvadesetih godina: bez ičega među kontaktima – vakuumski prekidač. U evakuiranoj izolacijskoj posudi su kontakti, među kojima prestaje spoj čim se neznatno razdvoje. Zbog visoke temperature na mjestu razdvajanja, metal ispušta ione koji omogućuju vođenje u međuprostoru, do dolaska izmjenične struje na vrijednost nula. Ako je razmak otvorenih kontakata dovoljno velik da električno polje više ne može iščupati ion iz metala, prestaje mogućnost toka struje među kontaktima. Danas se vakuumski prekidači primjenjuju u mrežama srednjeg napona, osobito ondje gdje je sklapanje učestalo – trajnost im je najveća, među svim dosadašnjim rješenjima.

Prekidači za vrlo visoke, a osobito najviše napone – bilo da su malouljni, pneumatski ili sumpor-heksafluoridni – izvode se s višestrukim prekidanjem luka. Povezuje se, naime, više aktivnih prekidačkih elemenata u seriju. Time se električni luk rastrgne na dva, četiri, šest ili čak više mjesta i tako svlada (slika 17.4). Jasno je da uređaj postaje veoma složen;

Slika 17.4. Pneumatski prekidač i okretni rastavljač 400 kV

sve kinematske pojave trebaju se odvijati istodobno, kako u svim prekidačkim elementima pojedine faze – tako i u sve tri faze cjeline prekidača.

Mehanizmi za pogon prekidača moraju osigurati relativno velike sile, a osobito velike brzine kretanja kontakata pri sklapanju i već spomenutu sinkroniziranost. Na početku su to bili pogoni s ručno ili elektromotorom navijenom oprugom, s pneumatskim prekidačima dolaze i pneumatski pogoni, a u primjeni su i uljnohidraulički pogoni. Svi se i danas susreću u primjeni, premda prednost imaju motorno-opružni pogoni, jer ne zahtijevaju dobavu i redovitu zamjenu ulja te energiju za tlačenje (što traže uljnohidraulični pogoni). Bitan zahtjev koji moraju ispunjavati svi pogoni: nakon uključenja prekidača, mora biti u njemu akumulirana pogonska energija za njegovo isključenje. Ako ona nije dovoljna, pa bi se isključenje odvijalo presporo, prekidač mora biti blokiran prema isključenju kako bi se onemogućila havarija.

Razvojni put prekidača išao je prema smanjenju dimenzija i mase prekidača za istu rasklopnu struju i druge nazivne podatke, te prema jednostavnijoj konstrukciji. Na tom putu neprekidno su rasli zahtjevi u pogledu visine rasklopne struje (danas je redovito dosegnuto 63 kiloampera) i što manjeg trajanja isključenja (danas se redovito doseže 30-tak milisekunda, što je jedan i pol puta trajanje perioda izmjenične struje od 50 herca – 20 milisekunda). Jedan pol prekidača od 400 kilovolta visok je oko četiri metra i oko dva metra dug – unutar tri stotinke sekunde odvije se u njemu doista složen kinematski, termodinamski, električni i elektrokemijski proces!

Zanimljiv je način kojim se, tijekom razvoja pneumatskog prekidača, postizalo skraćenje vremena isključenja. Najprije je spremnik sa stlačenim zrakom bio odvojen od prekidača. Nalog za isključenje upućivan je ventilu između spremnika i sklopne komore prekidača. Trebalo je relativno dugo vrijeme da zrak dostruji do rasklopnog mjesta. Kasnije je spremnik montiran u postolje prekidača, što bliže sklopnim komorama, ali na potencijalu uzemljenja. Konačno je spremnik u obliku kugle postavljen na fazni potencijal tako da je u sklopnoj komori neprekidno stlačeni zrak (slika 17.4). Nalog za isključenje otvara ventil iz komore prema okolini, te se uz najmanje izgubljenog vremena ostvari strujanje stlačenog zraka za gašenje električnog luka. Dopunjavanje spremnika zrakom dakako mora se odvijati izolacijskim cijevima, kao što se takvim cijevima moraju upućivati i nalozi za sklapanje, impulsom stlačenog zraka ili ulja.

U najnovije doba, porodica sumpor-heksafluoridnih visokonaponskih prekidača uobičajeno se razdvaja u dvije grane: *prekidači sa sklopnom komorom na visokom faznom potencijalu*[124] i *prekidači sa sklopnom komorom na potencijalu zemlje*[125]. Prvi prekidači se uobičajeno izvode za niže područje visokih napona (međutim dosežu već i do 800 kV), a drugi su uobičajeniji za ekstra visoke napone. Kod prekidača sa sklopnom komorom na visokom faznom potencijalu, ta je komora smještena u šuplji izolator ispunjen plinom a poduprta je nosivim izolatorskim stupom, radi odvajanja od potencijala zemlje. Kod prekidača sa sklopnom komorom na potencijalu zemlje, ta komora smještena je u metalni kotao i izolirana prema kotlu plinom a iz kotla *izviruju* provodni izolatori za ulazne i izlazne priključke na prekidač, ukupno 6 komada u tropolnoj izvedbi prekidača.

---

[124] live tank circuit breaker (engl.)

[125] dead tank circuit breaker (engl.)

18

Visokonaponska rasklopna postrojenja

Električna rasklopna postrojenja[126] su elektroenergetski objekti koji omogućuju učvorenje više vodova u mreži, njihovo međusobno spajanje i razdvajanje. Rasklopna postrojenja različitih napona povezana su energetskim transformatorima i takva cjelina tvori transformatorsku stanicu. Rasklopnim postrojenjima se i elektrane priključuju na mrežu. Sa stajališta prijenosa električne energije, zanimljiva su rasklopna postrojenja visokog napona (kod nas: 110 kV i više) i rasklopna postrojenja srednjeg napona (kod nas, danas uobičajeno: 10, 20 i 35 kV), jer takva postrojenja čine transformatorske stanice u kojima se električna energija iz mreže prijenosa predaje distribucijskoj mreži.

Visokonaponska rasklopna postrojenja sastoje se iz građevinskog dijela (prostor i građevinski objekti) i električnog dijela. Električni dio čine: glavno (osnovno, primarno) postrojenje, pomoćno postrojenje (sekundarno postrojenje: npr. mjerenje, zaštita, dojava-signalizacija, upravljanje) i uzemljenje. Na prvi pogled, najzanimljivija su rješenja glavnog postrojenja i njihova svojstva.

Izvedbe rasklopnih postrojenja

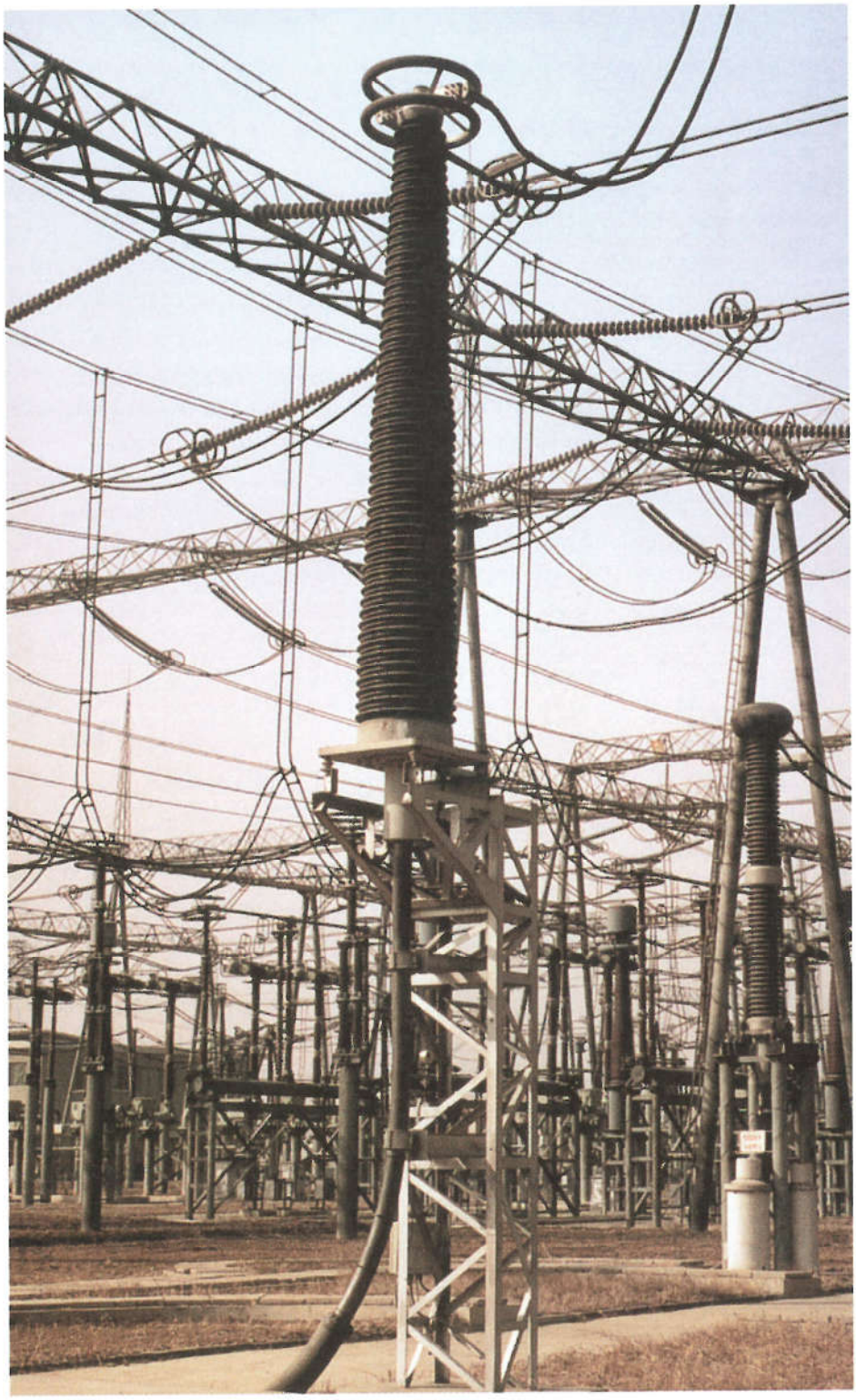
Kako je kod visokonaponskih dalekovoda okolni zrak osnovna izolacija između faza i faza prema zemlji, to je i za rasklopna postrojenja visokog napona primjenjivano rješenje izolacije okolnim zrakom. To su *vanjska rasklopna postrojenja*[127] (postrojenja na otvorenom ili *postrojenja izolirana zrakom*[128]) (slika 18.1).

Rastom gustoće potrošnje električne energije, sve dublje treba ulaziti rasklopnim postrojenjima u urbanizirana područja. Iz estetskih, sigurnosnih, ekoloških, ali i ekonomskih razloga (skupo građevinsko zemljište u takvom prostoru) težilo se smanjenju dimenzija i zatvorenosti postrojenja. Rješenje: *unutrašnja postojenja*[129]. U početku je oprema za vanjska postrojenja, neznatno ili nimalo prilagođena, ugrađena u velike hale, no to nije bilo efektno rješenje. Kasnije su sva oprema i svi vodiči smješteni u cijevi, bez električnog dodira, a međuprostor se ispunio sumporovim heksafluoridom pod tlakom[130]. Ostvareno je postrojenje vrlo komprimiranih dimenzija i vrlo sigurno prema električnom proboju. Za vrlo visoke napone svaka faza postavlja se u odvojenu cijev, a kod manjih visokih napona sve tri faze postavljaju se u zajedničku cijev. Postrojenja imaju izgled uvriježen za procesnu industriju (slika 18.2)!

Ona industrija koja koristi vrlo velike količine električne energije, također treba rasklopno postrojenje visokog napona, praktički u svome dvorištu. Kako takva industrija zna biti i veliki zagađivač, opet oklopljena sumpor-heksafluoridna izvedba predstavlja najbolje današnje rješenje, također, uz termoelektrane, uz strojarnice hidroelektrana smještenih podzemno ili za postrojenja na morskoj obali uz veliku izloženost posolici.

---

[126] switchgear (engl.), Schaltanlage (njem.)
[127] outdoor switchgear (engl.), Freiluftanlage (njem.)
[128] AIS = Air Insulated Switchgear (engl.)
[129] indoor switchgear (engl.), Innenraumanlage (njem.)
[130] GIS = Gas Insulated Switchgear (engl.)



Slika 18.1. Vanjsko užadno postrojenje 500 kV *u Kini*

Srednjonaponska postrojenja rijetko se danas izvode kao vanjska (iznimno izvan većih mjesta), a mnogo češće u zatvorenim prostorima, unutrašnja izvedba. Rijetko je to danas otvorena izvedba (zračna izolacija u praktički otvorenim ćelijama), češće oklopljena izvedba, a ponegdje i svestrano izolirana – krutom ili sumpor-heksafluoridnom izolacijom.

Osnovne sheme rasklopnih postrojenja

Postrojenja visokog, a osobito vrlo visokog napona ipak – danas – masovno karakterizira vanjska izvedba, te je primjereno upućivanje u još neke osobitosti takve izvedbe. Osobitosti naglašeno određuju:

– osnovna shema postrojenja,
– izvedba vodiča u postrojenju,
– izvedba rastavljača,
– međusobni raspored vodiča,
– izvlačivost prekidača.

Osnovna svojstva nekih osnovnih shema rasklopnih postrojenja

Oznaka	Tip postrojenja	Svojstvo	Komentar
a	S jednostrukim sabirnicama	Nema redundancije prekidača i sabirnica	Najjeftinije i najelementarnije postrojenje
b	Sa sekcioniranim sabirnicama	Jedna sekcija sabirnica i odvodi priključeni na nju može biti u pogonu dok je druga sekcija neraspoloživa	Poboljšana svojstva, a nije bitno skuplje od tipa (a)
c	S dvostrukim sabirnicama	100%-tna redundancija jednog sabirničkog sustava i mogućnost razdvojenog pogona odvoda u dvije grupe	Dvostruki broj sabirničkih rastavljača nego u (a) ili (b); skuplje i prostorno zahtjevnije postrojenje
d	S glavnim i pomoćnim sabirnicama	Svaki prekidač zamjenjiv prekidačem spojnog polja, a u varijanti s dvostrukim glavnim sabirnicama ima svojstva i od (c)	Slično kao tip (c), primjenjuje se pri malom ukupnom broju polja, želi li se povećati njihova raspoloživost u slučaju neraspoloživosti jednog njihova prekidača
e	S 1½ prekidača po polju	Mnogobrojne kombinacije grupiranja odvoda i čak trećina prekidača smije biti neraspoloživa	Najveće zauzimanje prostora, najskuplje postrojenje
f	S izvlačivim prekidačima	Svaki prekidač zamjenjiv rezervnim prekidačem, jednim u postrojenju	Otpadaju sabirnički i izlazni rastavljači; bitno pojeftinjenje i smanjenje zauzetog prostora

U osnovnoj shemi ističu se *sabirnice*[131] – predstavljaju čvorište za sve odvode i dovode, i *sklopna polja*[132], skraćeno kažemo samo: polja – skup svih komponenata koje služe priključku jednog odvoda ili dovoda, a tipično sadrži spoj sabirničkog rastavljača, prekidača i izla-

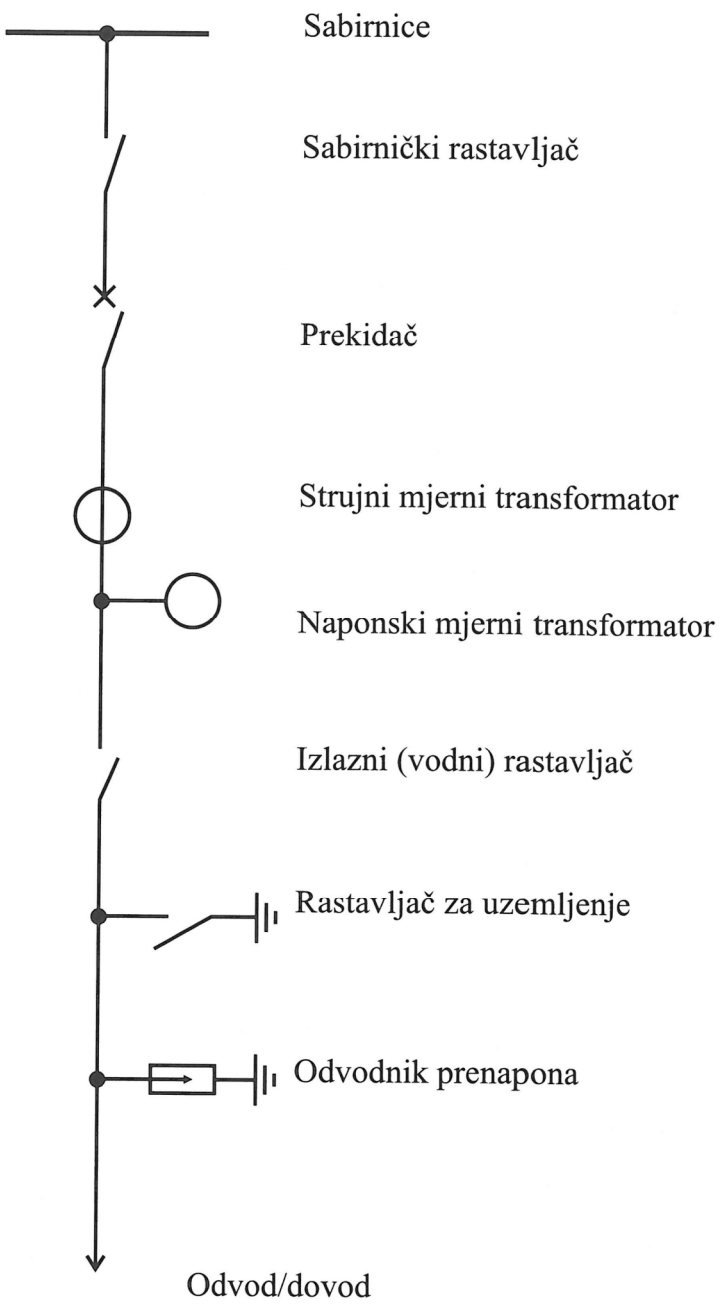
[131] busbars (engl.), Sammelschienen (njem.)
[132] bay, feeder (engl.), Feld (njem.)

Slika 18.2. Unutrašnje sumpor-heksafluoridno postrojenje

znog rastavljača, strujnih i naponskih mjernih transformatora te – eventualno – odvodnika prenapona (slika 18.3). Osnovna shema postrojenja uvjetuje količinu ugrađenih prekidača i rastavljača te veličinu zauzetog prostora.

Uobičajene osnovne sheme postrojenja su: s jednostrukim sabirnicama, sa sekcioniranim sabirnicama, s dvostrukim sabirnicama, s trostrukim sabirnicama, te s glavnim i pomoćnim sabirnicama (slika 18.4). Danas u svijetu, u postrojenjima vrlo- i ekstra-visokog napona primjenjuju se sheme koje se razlikuju od tih konvencionalnih shema. Karakteristično je za te sheme da, u slučaju kvara ili nužnog cikličkog remonta nekog od prekidača, omogućuju pogon svih priključenih vodova, generatora i transformatora. Ukupan broj prekidača veći je od broja polja tako da se govori o postrojenju s, primjerice, jednim i pol prekidačem po polju. Složenom logikom zaštitnih uređaja osigurava se i rezervno djelovanje na prekidače ako zataji osnovni prekidač, ali tako da izvan pogona ostane najmanji dio postrojenja.

Vodiči kakvi se primjenjuju u vanjskim visokonaponskim postrojenjima su užadni ili cijevni. Užad može biti spletena od aluminijskih žica ili kombinirano – alučelično rješenje. Alučelično rješenje je prikladno zbog toga što je većina spojne i ovjesne opreme identična

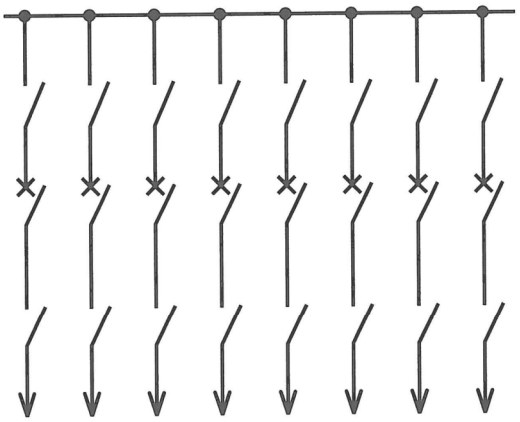


Slika 18.3. Tipični sastav polja u jednostavnom postrojenju (jednopolni prikaz)

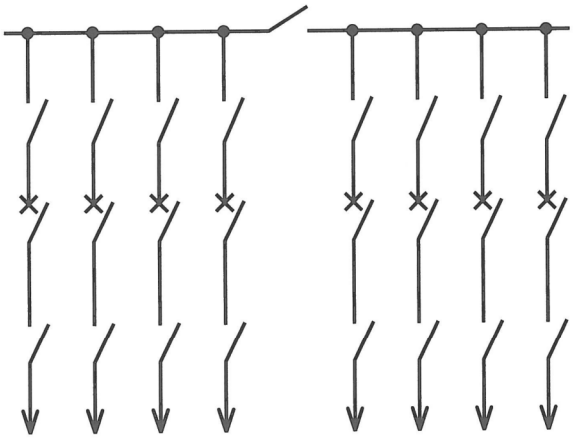
dalekovodnoj. Aluminijsko rješenje je pogodnije za izradu mnogobrojnih detalja u postrojenju; spajanje dvokomponentnog užeta mnogo je složenije nego spajanje homogenog – međutim gubi se prednost primjene istog nosivog i spojnog materijala. Užadno rješenje traži dosta prostora: osim normalnog razmaka sigurnog prema preskoku, treba biti i rezerva da se osigura razmak pri njihanju od vjetra (slika 18.1).

Ovješenje vodiča treba biti dovoljno visoko od tla da bi i u *trbuhu* vodiča razmak bio siguran, i kada se tamo nalaze radnici i mehanizacija koja služi održavanju i intervencijama.

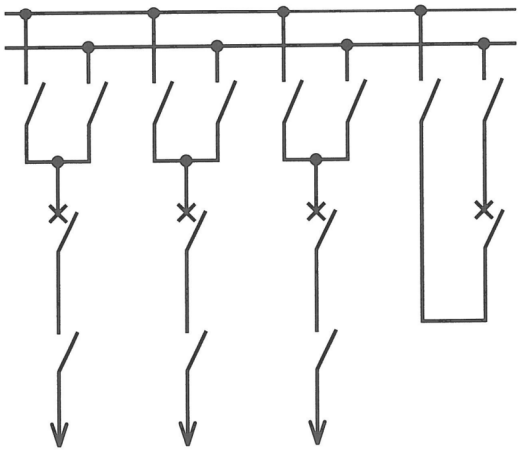
Cijevni vodiči omogućuju manje razmake i među sobom i prema tlu, jer su im provjes i amplituda njihanja pri vjetru neznatni u odnosu na uže. Traže, međutim, svoju izvedbu nosive i spojne opreme i potporne izolatore (dok je užad ovješena na izolatorskim lancima



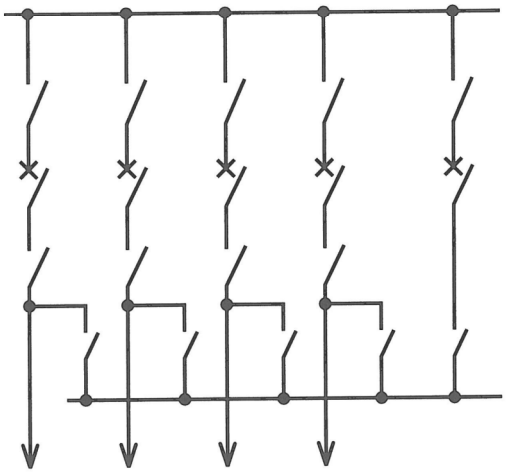
(a) S jednostrukim sabirnicama



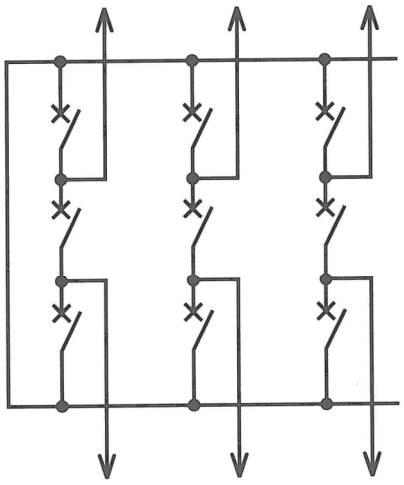
(b) Sa sekcioniranim sabirnicama



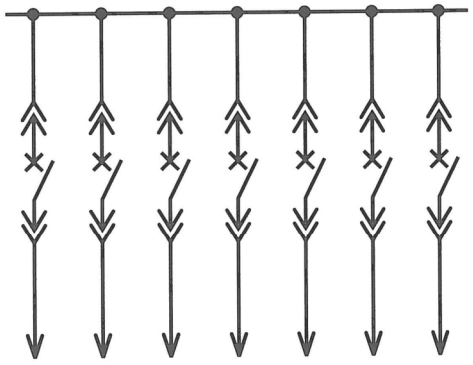
(c) S dvostrukim sabirnicama



(d) S glavnim i pomoćnim sabirnicama

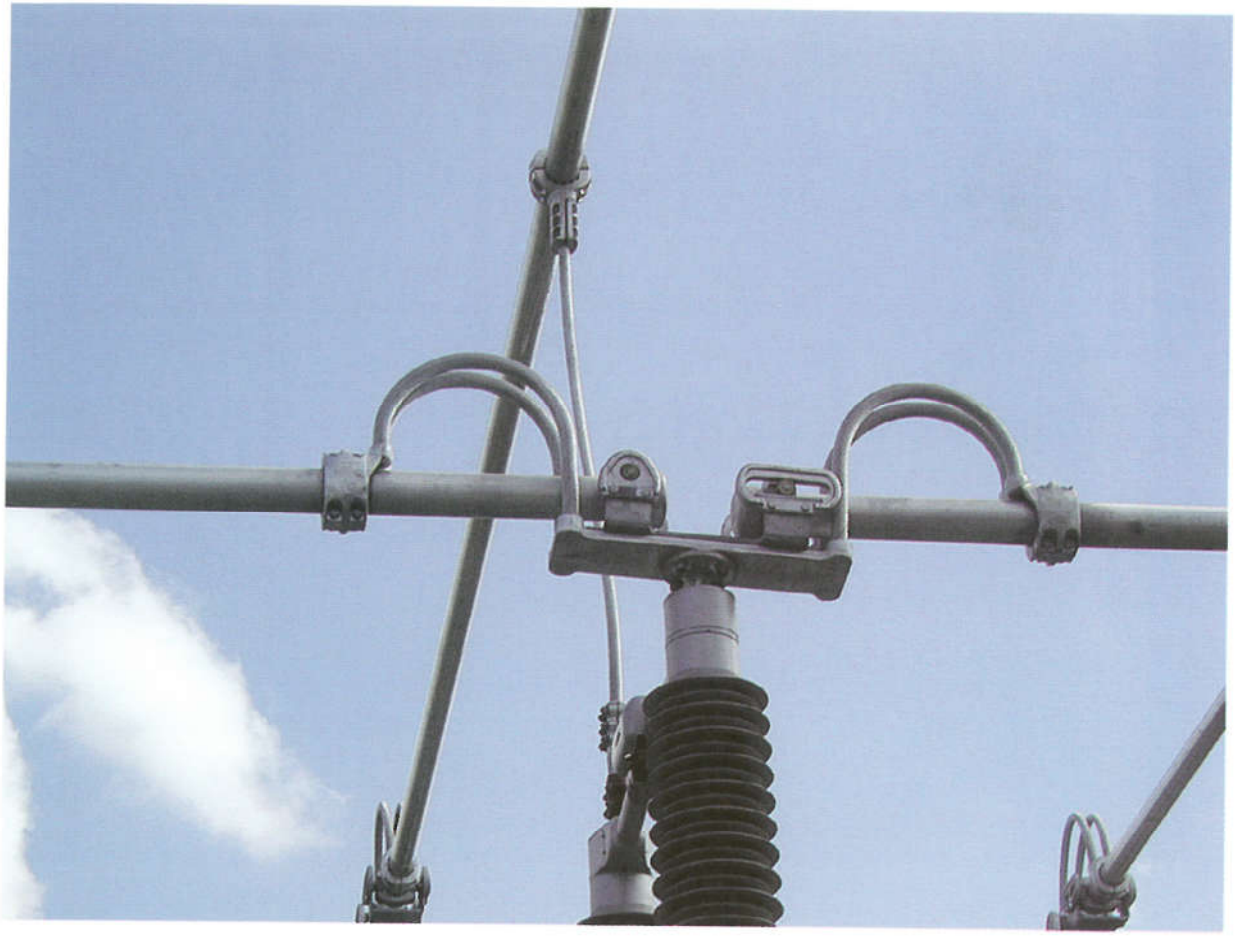


(e) S 1 ½ prekidača po polju



(f) S izvlačivim prekidačima

Slika 18.4. Neke osnovne sheme rasklopnih postrojenja



Slika 18.5. Nošenje cijevnih sabirničkih vodiča

kakvi se primjenjuju na dalekovodu) (slika 18.5). Tlocrtno manja postrojenja ne znače samo manje građevinsko zemljište i manje estetsko opterećenje okoline, nego i manje pomoćnih građevinskih objekata (cesta, kanalizacije, travnjaka, ograda), manje duljine kabela pomoćnog postrojenja i cijevi komprimiranog zraka (ako je primijenjen), te manje troškove općeg održavanja. Manje visine postrojenja i podupiranje, umjesto ovješenja vodiča, znači manje čeličnih konstrukcija za nošenje svekolike opreme rasklopnog postrojenja. Materijal za cijevne vodiče je uobičajeno aluminij legiran sa silicijem i magnezijem (slika 18.6. i 18.7).

Rastavljači[133] služe poželjnom spajanju i razdvajanju pojedinih dijelova postrojenja, stvaranju potrebne tekuće uklopne sheme. Njima se ne može niti smije prekidati ili uspostavljati strujni krug, njima se vidljivo razdvaja nešto što je pod naponom od dijela koji nije pod naponom ili se polje priprema za priključak na pojedini sustav sabirnica, a konačno uključenje tog polja obavlja se prekidačem. Obrnuto, isklop polja obavlja se najprije prekidačem, a potom – ukoliko je to potrebno – isključuju se rastavljači s obje strane tog prekidača i tako neopozivo i vidljivo ostvaruje beznaponsko stanje tog prekidača.

Rastavljači svojom izvedbom bitno utječu na tlocrtnu veličinu postrojenja. Klasično rješenje rastavljača s dva noža koji se zakreću u horizontalnoj ravnini traži najveći nacrtni i tlocrtni prostor (slika 17.4). Otvoreni noževi usmjereni su prema vodičima susjedne faze i ukupni tlocrtni međufazni razmak mora biti za toliko uvećan. Bolje rješenje je zakretanje

[133] disconnector, isolator (engl.), Trennschalter, Trenner (njem.)

Slika 18.6. Rasklopno postrojenje 110 kV *u TS* 400/110 kV *Ernestinovo*

dva noža, u vertikalnoj ravnini. Međufazni tlocrtni razmak ne treba uvećati za duljine otvorenih noževa jer su oni okrenuti *prema nebu*. Ali taj rastavljač je konstrukcijski složeniji i skuplji od klasičnog. Još složenije, ali nacrtno komprimiranije rješenje pruža pantografski ili semipantografski rastavljač. Traži najmanje prostora. Takav rastavljač ima zglobnu *ruku* koja u ispruženom položaju *šakom* hvata mirni kontakt. U isključeni položaj stavlja se prelamanjem ruke u *laktu*.

Cijevno rješenje vodiča i pantografska izvedba rastavljača može potreban tlocrt jednog 400 kilovoltnog postrojenja upoloviti u odnosu na užadno rješenje s rastavljačima koji imaju noževe okretne u horizontalnoj ravnini. Kada se zna da takvo postrojenje zauzima desetak hektara, onda je jasno da je rezultat štednje doista efektan.

Radi li se o višestrukim sustavima sabirnica, tada je moguće rasporediti u prostoru trofazni slog jednog sustava i pored njega trofazni slog drugog sustava (eventualno još: trofazni slog trećeg sustava). Između svih vodiča treba ostvariti razmak koji odgovara linijskom naponu. Ako se grupiranje izvede drukčije: da vodiči iste faze raznih sustava budu jedan do drugog – tada njihov razmak može biti znatno manji, dimenzioniran prema faznom naponu[134]. To je postrojenje s tzv. miješanim sabirnicama.

[134] Koji je $\sqrt{3}$ puta, dakle 1,73 puta, manji od linijskog napona!

Slika 18.7. Rasklopno postrojenje 400 kV *u TS* 400/110 kV *Ernestinovo*

Ekonomizira se i s vertikalnim razmještanjem sabirničkih vodiča i spojnih vodiča u polju – što je smješteno iznad, a što ispod. Sabirnice ispod vodiča polja znače manje čelične konstrukcije, ali pad jednog vodiča iz bilo kojeg polja na njih onemogućuje ukupan pogon svih polja do popravka. Stoga se ipak najčešće izvode sabirnički vodiči iznad vodiča u poljima.

Suvremene izvedbe rasklopnih postrojenja

Pri izvođenju postrojenja vrlo visokih napona ponekad se nastoje kombinirati dva rješenja u istom postrojenju radi što boljeg iskorištenja prednosti i izbjegavanje mana svakog od njih. Često se za takve izvedbe primjenjuje naziv: hibridna rješenja. Kombinacijski kriterij pri tome je najčešće: razumno male dimenzije uz razumne troškove izgradnje i održavanja. Primjer su cijevni sabirnički vodiči, a užadni poprečni spojni vodiči u poljima (ti su kraći pa nije presudan provjes i njihanje, a omogućuju jeftiniju montažu zbog manje rada i jeftinije spojne opreme). Ili, pantografski sabirnički, ali okretni vodni rastavljači (ti su jeftiniji, a ne povećavaju bitno tlocrt). Ili, samo sabirnice vanjskog rasklopnog postrojenja u oklopljenoj sumpor-heksafluoridnoj izvedbi (time se smanjuje zauzet tlocrt u poprečnom smjeru, a sabirnice postaju vrlo pouzdane) a polja u otvorenoj izvedbi (ne sudjeluju toliko bitno u zauzimanju tlocrta).

Obrnuto: sabirnice u otvorenoj izvedbi a polja u oklopljenoj sumpor-heksafluoridnoj izvedbi, kompaktno, *visokointegrirano rješenje*[135]; polja su malog volumena i kompletno, modularno, zgotovljena u tvornici (slika 18.8).

[135] HIS = Highly Integrated Switchgear (engl.)

Slika 18.8. Visokointegrirano postrojenje 110 kV *(vodno-transformatorsko polje)*

Slika 18.9. Izvlačivi vakuumski prekidač 35 kV

U srednjonaponskim postrojenjima unutrašnje izvedbe danas je uobičajena primjena tzv. *izvlačivih prekidača*[136] (slika 18.9). U građi polja najbitniji i najsloženiji aparat je prekidač, koji je izložen potrebi cikličke revizije a – objektivno – najizloženiji je i kakvoj neispravnosti ili čak kvaru. U konvencionalno izvedenom polju, ako je prekidač u zastoju iz bilo kojeg od tih razloga i cijelo polje je u zastoju (osim ako nije izvedeno postrojenje s pomoćnim sabirnicama). U postrojenju s izvlačivim prekidačima, prekidač se u takvu slučaju izvlači iz svog pogonskog položaja, namjesto njega se ulaže ispravni uvijek spremni rezervni prekidač i tako – uz mali prekid pogona – sanira neraspoloživost osnovnog prekidača. Taj se onda podvrgne reviziji ili popravku u izvanpogonskom i beznaponskom stanju, da bi nakon toga on postao spremna rezerva za neki drugi prekidač u postrojenju. U takvom postrojenju otpada ugradnja sabirničkog i izlaznog rastavljača, rastavljivi spojevi prekidača preuzimaju te uloge, te je čitavo postrojenje komprimiranih dimenzija i povećane raspoloživosti. Danas se takvi izvlačivi prekidači već primjenjuju i u vanjskim rasklopnim postrojenjima sve višeg napona (slika 18.10).

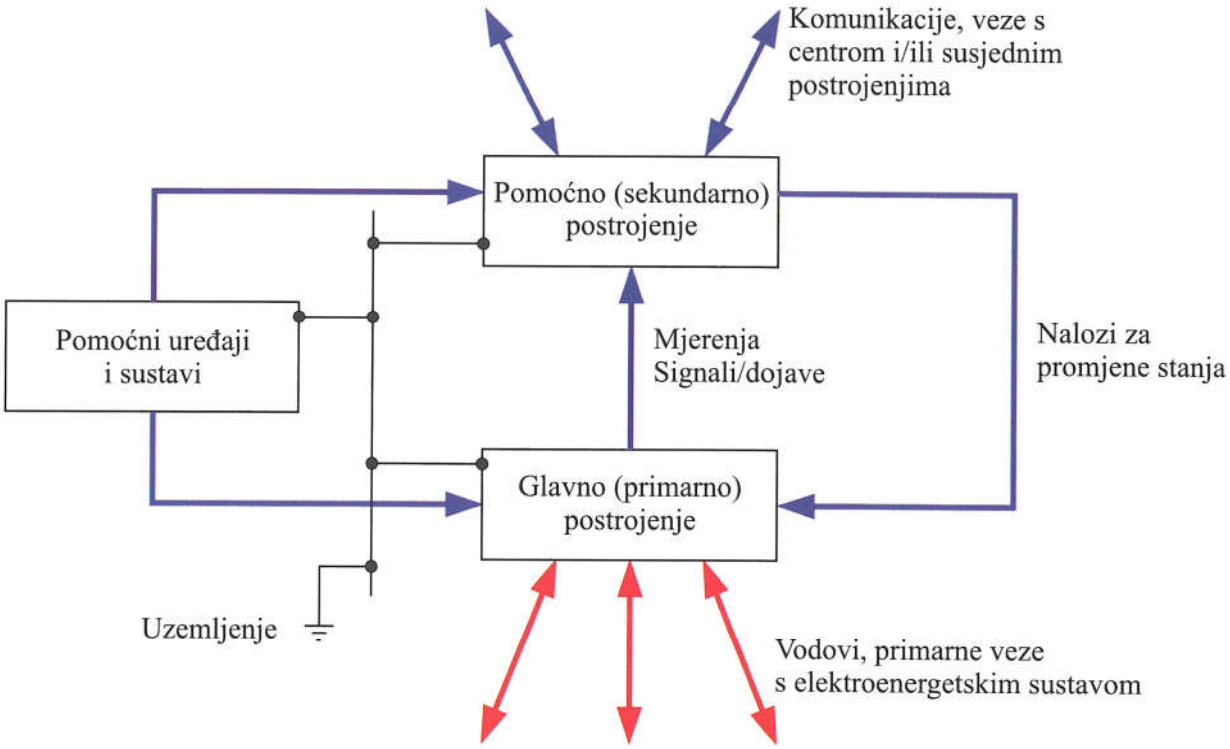
Slika 18.10. Izvlačivi prekidač 300 kV

[136] switchgear with withdrawable circuit-breaker (engl.)

19

Tendencije u sekundarnom postrojenju

Sekundarno, pomoćno, postrojenje čini složeni i isprepleteni sustav koji omogućuje zaštitu, automatizaciju, nadzor stanja, mjerenja, registraciju, regulaciju, te manipulacije (upravljanje, komandu) glavnim-primarnim-osnovnim postrojenjem. To je živčani sustav tijela koje zovemo električnim rasklopnim postrojenjem (slika 19.1).

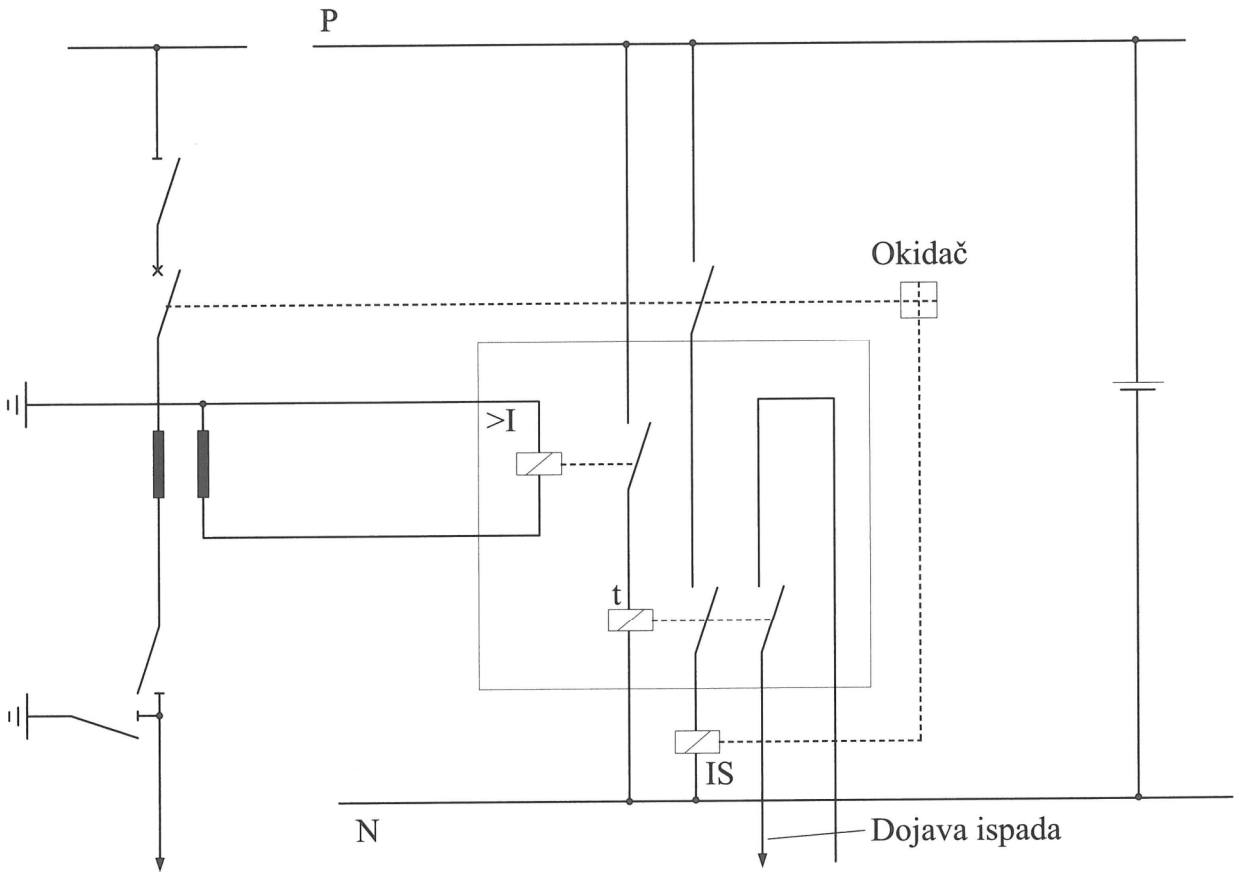


Slika 19.1. Položaj pomoćnog (sekundarnog) postrojenja

Glavni podsustavi sekundarnog postrojenja

Uređaji i sustav zaštite u postrojenjima omogućuju utvrđivanje mjesta i vrste greške na dalekovodima i/ili u postrojenjima i dovode do isključivanja kvarnih dijelova iz pogona i to tako da izvan pogona ostane najmanji dio mreže (ali da sadrži mjesto kvara). Najčešća i najelementarnija zaštita je nadstrujna zaštita s vremenskim zatezanjem (slika 19.2). Ako je riječ o dalekovodu, u pravilu je zaštita izvedena tako da se nakon neispravnosti dalekovod kratkotrajno obostrano isključi (najčešće samo kvarna faza) i potom izvede automatsko ponovno uključenje. Time velik dio prolaznih neispravnosti nestane i pogon se nastavi. Beznaponsko stanje traje manje od jedne sekunde, a prepoznajemo ga po iznenadnom treptaju rasvjete. Moderna zaštita dalekovoda opskrbljena je sustavom za lociranje mjesta greške.

Zanimljiv je primjer podfrekvencijske zaštite. Ako je opterećenje elektroenergetskog sustava, u cjelini, veće od ukupno angažirane snage elektrana, vrtnja agregata se us-



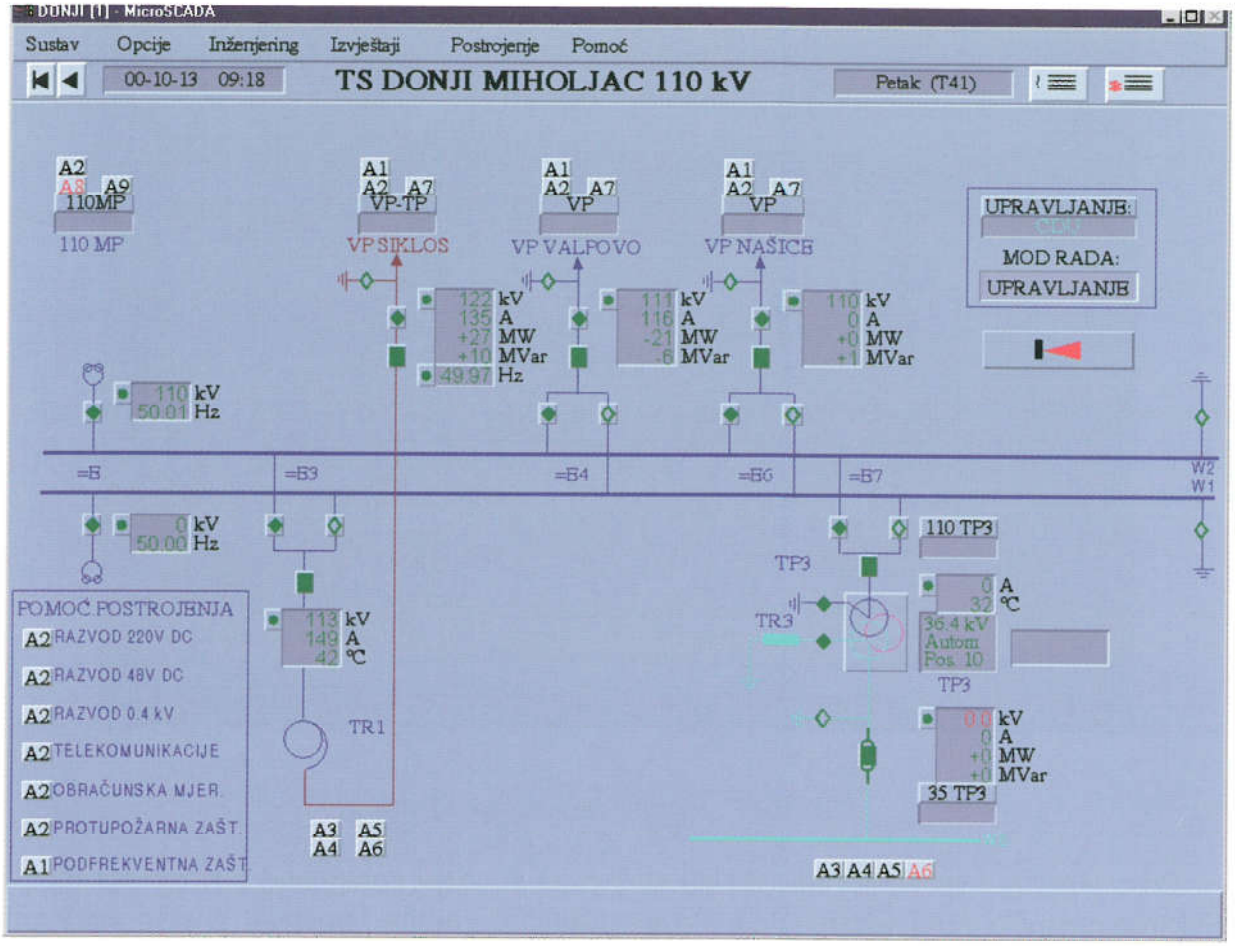
Slika 19.2. Nadstrujna zaštita s vremenskim zatetanjem

porava i frekvencija se smanjuje. Okolnosti su za ispad preopterećenih elektrana, bitan manjak snage i raspad sustava. Da se to preduhitri, uređaji podfrekvencijske zaštite – raspoređeni po cijeloj mreži – isključuju unaprijed pripremljene potrošače i sprečavaju povećanje debalansa.

Mogući su brojni drugi uređaji automatizacije u rasklopnim postrojenjima prijenosne mreže: uključenje rezervnog transformatora ako je osnovni dosegao stanovito opterećenje ili je ispao iz pogona, uključenje rezervnog dalekovoda ako je osnovni ispao iz pogona i slično.

Nadzor stanja mreže omogućuju uređaji za dojavu (signalizaciju) položaja brojnih aparata koji mogu biti uključeni ili isključeni ili mogu zauzimati i kakve druge složenije položaje (slika 19.3). Dojavljuju se i kvarna stanja, stanja koja bi mogla dovesti do kvara ili su na drugi način alarmantna i kritična. Nadzor i praćenje stanja omogućuju i uređaji za mjerenje veličina napona, struje, snage, energije, te njihovu obradu, prikaz i (osobito) registraciju. Konačno: obvezni dio sekundarnog postrojenja su sustavi ili organi pomoću kojih se manipulira: uključuje-isključuje ili na drugi način mijenja pogonsko stanje postrojenja i mreže (slika 19.4). Sastavni dijelovi upravljačkih krugova su sustavi blokade koji spriječavaju provedbu pogrešnih ili opasnih upravljačkih naloga. Tipični slučaj regulacije u prijenosnim mrežama je regulacija napona i sustavi za njezino automatsko provođenje.

Mnogi dijelovi sekundarnog postrojenja povezani su s primarnim postrojenjem tako da neprekidno utvrđuju vrijednost napona ili struje. Budući da je to postrojenje pod visokim naponom, neposredni priključak uređaja sekundarnog postrojenja nije moguć (kao što je



Slika 19.3. Nadzor stanja (dojave i mjerenja)

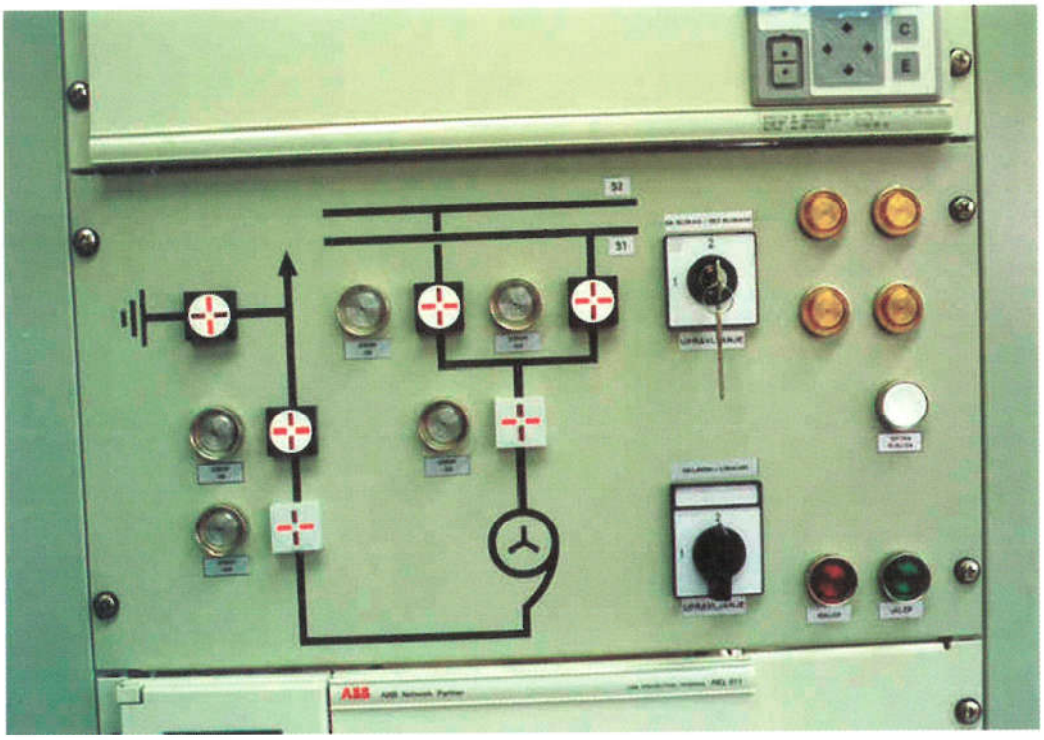
– načelno – moguć u niskonaponskim postrojenjima). Stoga, između glavnog i pomoćnog postrojenja posreduju mjerni transformatori, obvezna komponenta rasklopnih postrojenja koji visoke napone i velike struje pretvaraju u niske napone i male struje, pogodne za korištenje u pomoćnom postrojenju. Uz mjerne transformatore, pomoćno postrojenje kontaktira s glavnim postrojenjem i pomoću jednostavnih osjetila: pomoćnih kontakata koji stanovite položaje i stanovita stanja preslikavaju u električne signale tipa *da-ne*.

Tehnološke inovacije

Dinamičan razvoj poluvodičke elektronike od pedesetih godina i elektroničkih računala od šezdesetih godina prošlog stoljeća, vodili su rješenjima u sekundarnim postrojenjima rasklopnih postrojenja, koja se ubrzano zamjenjuju novima – sve kompleksnijih mogućnosti.

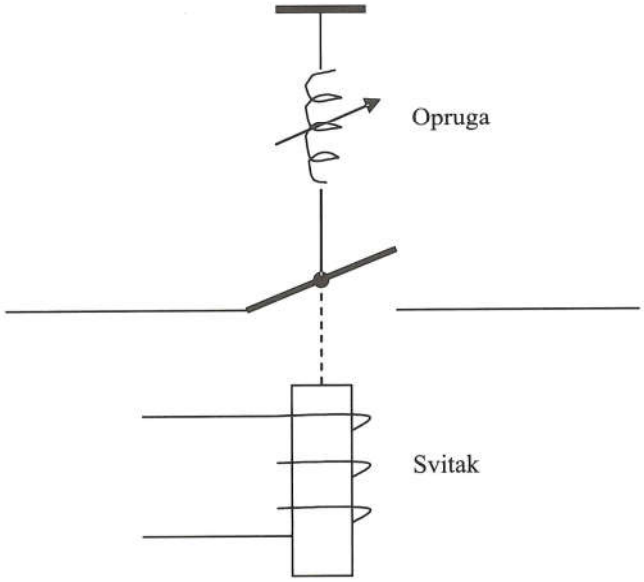
U prošlom stoljeću, u europskim prilikama ostvarivane su sljedeće razvojne stepenice:

- dvadesetih godina – primjena žične telefonije
- pedesetih godina – primjena elektromehaničkih sklopova
- koncem pedesetih – primjena tranzistorizirane tehnike
- koncem šezdesetih – primjena integriranih sklopova
- osamdesetih – primjena mikroprocesora.



Slika 19.4. Lokalno upravljanje s polja

Prije Drugog svjetskog rata, temelj složenijih uređaja pomoćnog postrojenja bio je elektromehanički relej (slika 19.5). Prije tridesetak godina temelj je postao analogni elektronički sklop, govori se o elektronskim statičkim uređajima. U današnje vrijeme temelj postaje digitalni procesor, dakle mikroračunalo. Povezivanje elektromehaničkih i analognih elektroničkih uređaja izvodilo se, kako su zahtjevi rasli, sve brojnijim žicama. Digitalni uređaji povezuju se 8-žičnim ili 16-žičnim vezama s multipliciranim iskorište-

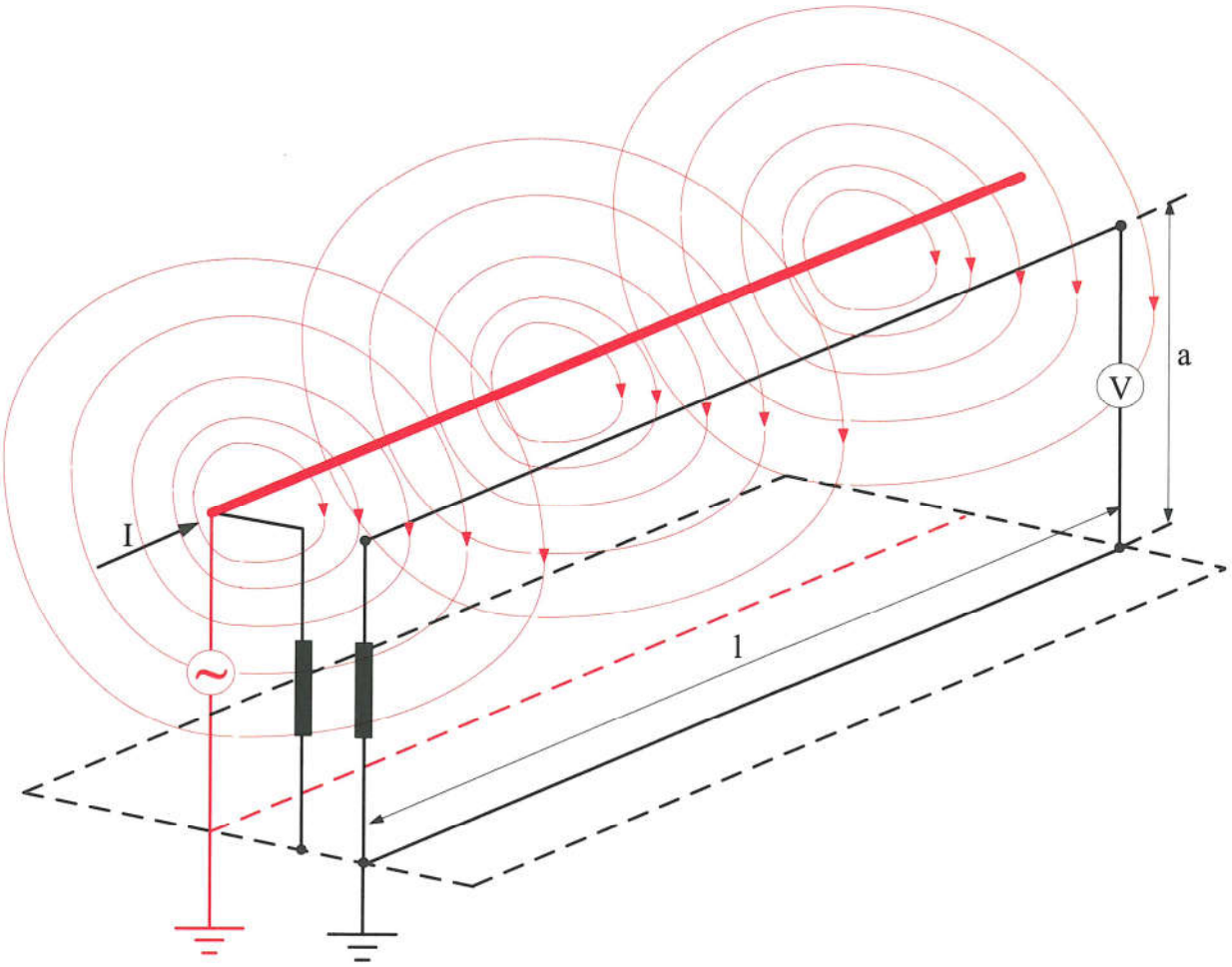


Slika 19.5. Elektromagnetski relej

njem, a u današnje vrijeme se za međusobno povezivanje uređaja na glavnim potezima koriste *svjetlovodi*[137].

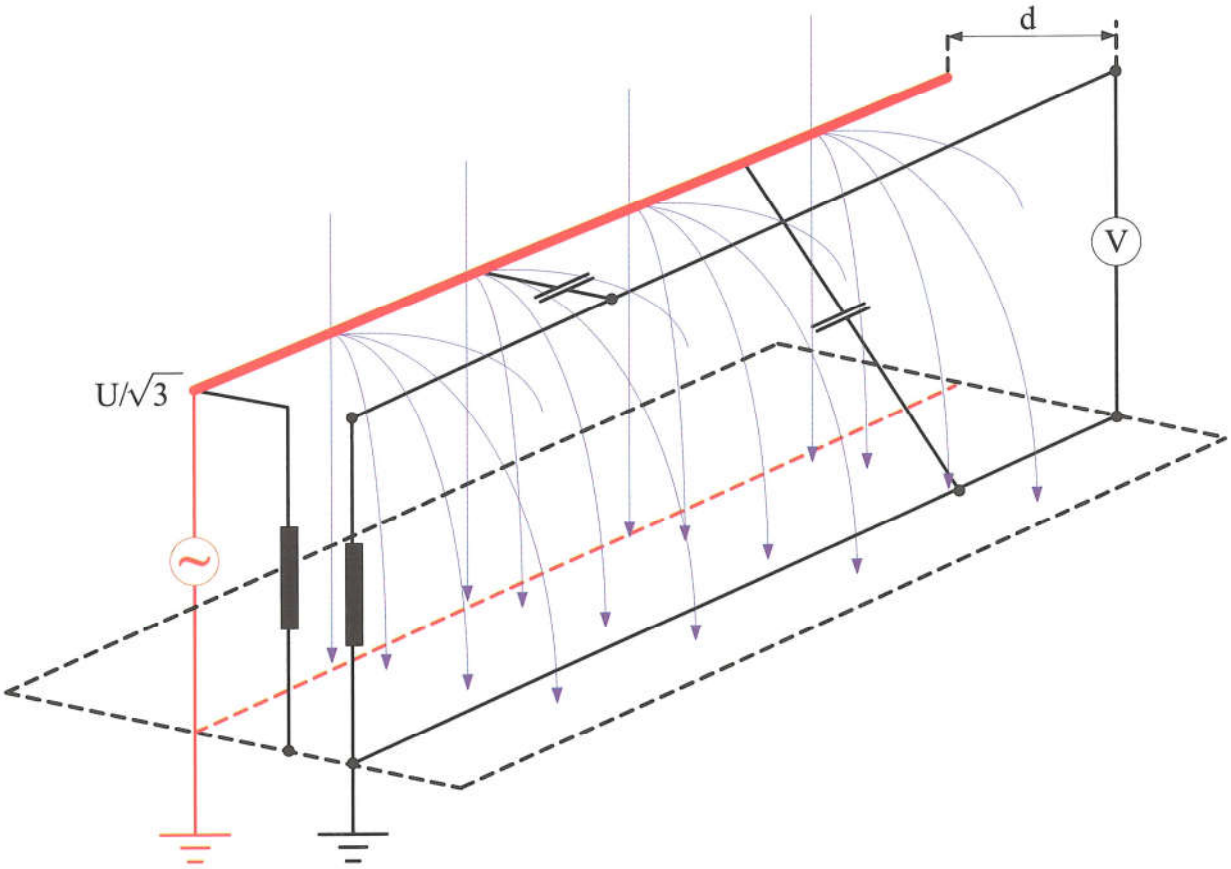
Karakteristično je za pomoćno postrojenje u cjelini, pogotovo za dulje vodove u pomoćnom postrojenju, da je izloženo elektromagnetskom utjecaju glavnog postrojenja u normalnom pogonu, a osobito pri neispravnosti ili pri manipulacijama, kada se elektromagnetska stanja naglo mijenjaju i uzrokuju smetnje u prostoru. Prema takvim smetnjama znatno su otporniji digitalni uređaji, a potpuno su na njih neosjetljivi svjetlovodi. Utvrđivanje okolnosti u kojima bi se mogli naći pojedini podsustavi pomoćnog postrojenja zbog elektromagnetskih utjecaja iz glavnog postrojenja, te iznalaženje načina za njihovo sažimanje na prihvatljivu mjeru, svodi se na utvrđivanje međusobne *elektromagnetske sukladnosti*[138] (slike 19.6 i 19.7).

Glavna današnja razvojna kretanja u rješenjima pomoćnih postrojenja karakterizira: visoka integracija funkcija (gubi se oštra granica između uređaja zaštite, mjerenja, nadzora, automatizacije, upravljanja); više razina koncentracije upravljanja (na razini objekta, na razini regije, na razini države, na razini interkonekcije); mogućnost decentraliziranog



Slika 19.6. Djelovanje magnetskog polja

[137] optical fiber (engl.), Lichtwellenleiter (njem.)
[138] EMC = Electromagnetic Compatibility (engl.)



Slika 19.7. Djelovanje električnog polja

funkcioniranja na relativno niskoj razini (praktički na razini sklopnog polja), ako iz bilo kojeg razloga više mjesto upravljanja *zataji*.

Sklopovske (*hardverske*) i programske (*softverske*) mogućnosti kompjuterske opreme, te brzine i kapaciteti prijenosnih puteva, danas su takvi da je zamislivo rješenje u kojem bi centralna jedinica mogla voditi cjelokupni pogon rasklopnih postrojenja na vrlo širokom području.

Međutim, uz visoku redundaciju (zalihost) svih komponenata, ipak bi ostala mala šansa za potpuno zatajenje neke karike takva složena sustava. Ostvarenje te šanse *po načelu peha* nastupa – koliko god je šansa mala. Stoga je današnje gledanje: što šire iskorištenje mogućnosti u oba smjera: prema centru, ali istodobno i na periferiji. Periferija mora moći autohtono elementarno funkcionirati i kada sve nadređene razine potpuno zataje, *padnu*.

U području mjerenja nastoji se mjerna veličina što prije pretvoriti iz analognog u digitalni oblik, otporan prema smetnjama i prikladan za raznovrsnu daljnju primjenu ili obradu. Prikaz i registracija idu za iskazom prosječne vrijednosti u stanovitom vremenskom intervalu, pamćenje graničnih vrijednosti i trenutka njihova nastupa, snimanje vremenskih tijekova. Uređaji danas omogućuju registraciju važnih veličina (struja, napona, upravljačkih naloga) neposredno prije neispravnosti ili poremećaja, i tijekom poremećaja, uz milisekundnu (danas već i mikrosekundnu) vremensku rezoluciju, sve vođeno daljinskom distribucijom točnog vremena. Kako bi se događaji u jednom postrojenju mogli vremenski posve sukladno sravnjivati s događajima u stotinama kilometara udaljenim drugim postrojenjima.

Najmodernija zaštita se osniva na numeričkim zaštitnim uređajima u kojima se pojedine veličine uspoređuju i kombiniraju svojim numeričkim nadomjescima, obradom u proce-

sorima kao pri obradi numeričkih vrijednosti računalima. Omogućena je time obrada bez izobličenja, «bez kašnjenja», uz ispunjenje najkompleksnijih logičkih zahtjeva i njihovo programsko (*softversko*) mijenjanje i preugađanje. Takvi uređaji omogućuju daljinsko nadgledanje njihova ugađanja, kao i daljinsko preugađanje i izbor logičkih mogućnosti – daljinski dijalog. Dakako i daljinski nadzor vrlo brojnih obilježja pojedinog reagiranja zaštite.

Uopće, svojstveno je današnjem pomoćnom postrojenju 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 omogućenja daljinskog snimanja cjelokupnog skupa pogonskih događaja s pridruženim trenutkom nastupa, uz milisekundnu ili čak mikrosekundnu točnost i sinkronizirano vrijeme u svim nadziranim objektima. Prijenos mjernih vrijednosti na daljinu, sve do moguće daljinske registracije energije radi obračuna. Uz nadzorne funkcije (mjerenje, dojava položaja i događaja) normalno je i daljinsko manipuliranje rasklopnim aparatima (daljinsko upravljanje, daljinska komanda)[139] te pomoćnim uređajima. Govorimo o kompleksnom *sustavu daljinskog vođenja*[140]. Karakteristično je da se on smišljeno prožima s lokalnim sustavima automatizacije, regulacije i upravljačkih sekvenca, kako bi se viša razina upravljanja osigurala od zagušenja. Signali se šalju spontano skupno a – na zahtjev – mogu se daljinski očitati detalji.

Na samom početku uporabe prijenosne mreže, primjenjivano je upravljanje koje je bilo udaljenije od neposredne blizine polja kojim se upravlja, dakle centralizacija upravljanja na razini postrojenja (slika 19.10). Centralno mjesto se se više udaljavalo, a obuhvaćeno područje širilo, do nacionalnih ili internacionalnih razina. Obuhvat se širio od nadzora (mjernih vrijednosti i signala, dakle smjer informacija samo iz postrojenja) do obuhvaćanja i obrnutoga smjera, omogućenja upućivanja upravljačkih i regulacijskih naloga u postrojenje.

Danas je u Hrvatskoj primijenjen sustav daljinskog vođenja prijenosne mreže u kojemu je središnje mjesto Nacionalni dispečerski centar u Zagrebu s četiri mjesta upravljanja područnom mrežom (Osijek, Rijeka, Split i Zagreb). Takva konfiguracija vođenja prijenosne mreže u tri stepenice, dakako i elektrana priključenih na tu mrežu i spojnih vodova prema susjednim mrežama, prilagođena je zemljopisnom obliku Hrvatske. Zemlje hrvatske veličine, pa i znatno veće, s *okupljenijim* teritorijem, obično izbjegnu jednu stepenicu pa u hijerarhiji upravljanja i imaju samo dvije stepenice: nacionalni centar i (izravno) transformatorske stanice/rasklopišta.

Telekomunikacije

Dakako, neprekidno se za potrebe daljinskog vođenja posezalo i za odgovarajućim rješenjima telekomunikacijskih veza, danas sve većim korištenjem veza putem svjetlovoda (radi velike brzine i – praktički – «neograničenog» kapaciteta).

Unutar složenih sustava pomoćnog postrojenja, prema pomoćnom postrojenju na drugoj strani dalekovoda, te prema centru daljinskog vođenja, mora biti uspostavljena trajna komunikacija. Komunikacijski sustavi koriste različite vrste prijenosnih puteva: danas najrjeđe žičane veze. Karakteristična je za prijenosnu mrežu primjena *visokofrekvencijskih veza pu-*

[139] SCADA = supervisory control and data acquisition (engl.)
[140] remote control (engl.), Fernführung, Fernsteuerung (njem.)

Slika 19.8. Akumulatorska baterija

Slika 19.9. Dizelski agregat 250 kVA

tem dalekovoda[141], mnogo desetljeća. Slijedi primjena koaksijalnih kabela uloženih u zaštitno uže dalekovoda. Usmjerene radio-veze i (osobito) korištenje svjetlovodima, suvremena su rješenja za kojima se poseže danas u ostvarenju sustava veza.

Primijenjena tehnika danas je takva da omogućuje još jednu osobinu: samokontrolu ispravnosti i dojavljivanje o neispravnosti, uz stanovitu samodijagnozu. Sve to dovodi do velike sigurnosti uređaja i mogućnosti trenutne reakcije u slučaju njihove neraspoloživosti.

Opskrba pomoćnim naponom

Znakovito je kolika se pozornost poklanja rješenjima sigurnog napajanja električnom energijom komponenata pomoćnog postrojenja, za njihov pogon (slika 19.8). Udvojene akumulatorske baterije i ispravljači, dva paralelna kabelska razvoda za napajanje udvojenih ključnih uređaja, do dva neovisna izvršna elementa, npr. svitaka za isključenje prekidača. Osiguranje od nestanka napajanja usprkos takvoj redundaciji: primjena kondenzatorskog sklopa s uvijek toliko nagomilane energije da se njegovim jednokratnim pražnjenjem kroz svitak za isključenje prekidača osigura nužno djelovanje tog svitka. Ili: punjive baterije dis-

Slika 19.10. Suvremeni upravljački prostor u TS 400/110 kV *Ernestinovo*

[141] PLC = power line communication (engl.)

locirane po kritičnim mjestima trajno priključene na pomoćni napon – u režimu, dakle, stalnog dopunjavanja. Nakon nestanka napajanja: automatsko galvansko odvajanje i nastavak autohtonog funkcioniranja oslonjenog na energiju nabijene baterije.

Za opskrbu električnom energijom izmjenične struje, u nuždi, primjenjuju se dizelski agregati u postrojenjima prema kojima su vrlo visoki zahtjevi pouzdanosti (slika 19.9). Oni moraju omogućiti opskrbu pomoćnog postrojenja, opskrbu nužne rasvjete i sličnih potreba i u slučaju potpunog raspada elektroenergetskog sustava. Za neprekidno napajanje izmjeničnim naponom uređaja, za koje bi izostanak takvog napajanja bio kritičan, primjenjuju se *sustavi neprekidnog napajanja*[142] koji se sastoje iz istosmjerno-izmjeničnog pretvornika priključenog na akumulatorsku bateriju. Redovita opskrba izmjeničnom strujom rješava se tzv. kućnim transformatorima, primarno priključenim na osnovno postrojenje kojem služe, ili na okolnu distribucijsku mrežu. Sve važnije transformatorske stanice imaju po dva kućna transformatora i vrlo složene sustave razvoda niskog napona 400/230 V, kako bi se vjerojatnost prekida napajanja tim naponom svela na najmanju moguću mjeru.

[142] UPS = uninterruptible power supplies (engl.)

20

Razvoj i izgradnja prijenosne mreže

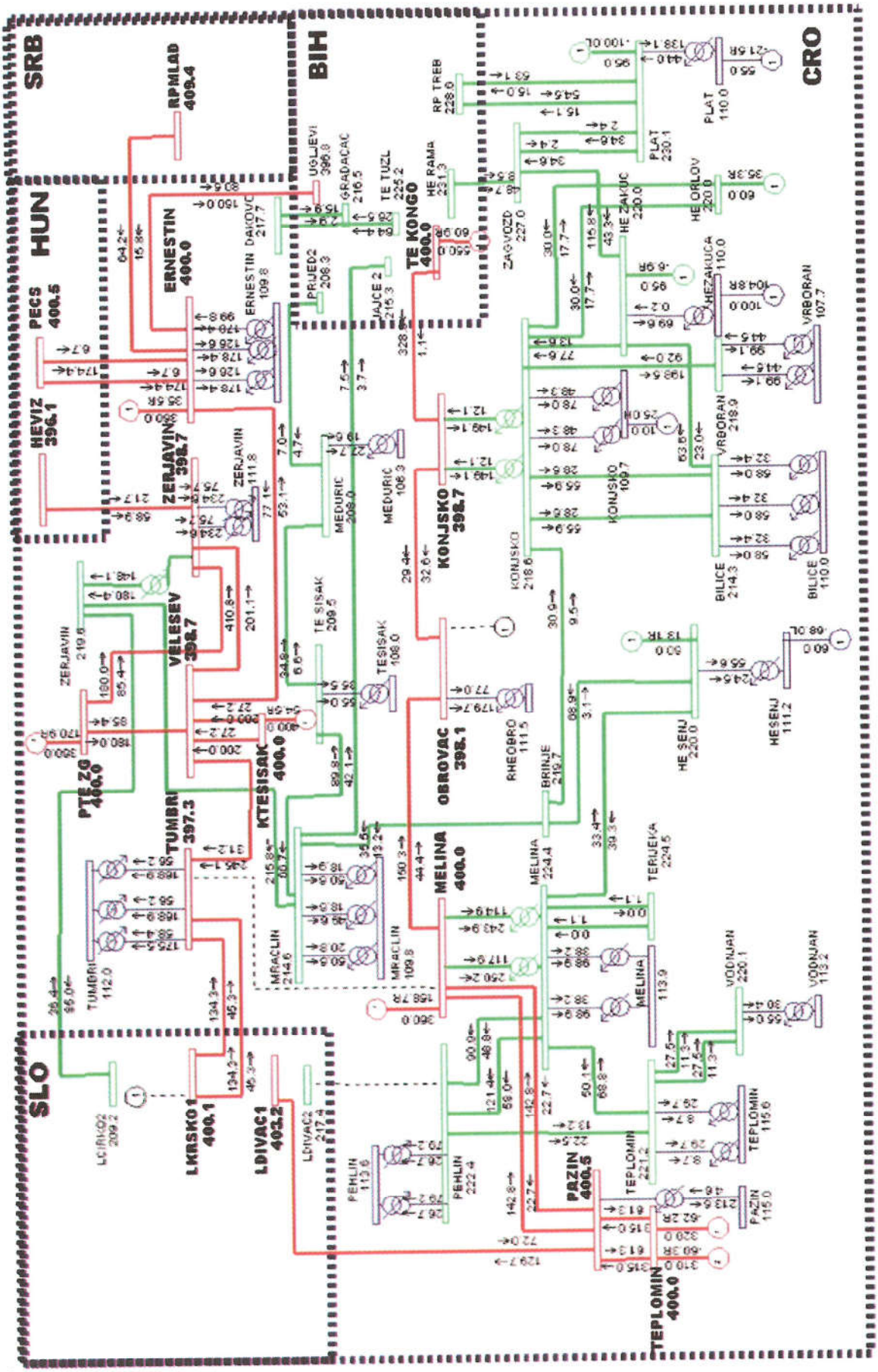
Razvoj prijenosne mreže

Planirati *razvoj*[143] *prijenosne mreže*, znači dimenzionirati je za obavljanje budućih predvidivih prijenosa električne energije, tako da omogući pouzdano vođenje elektroenergetskog sustava, kao i ekonomičnu opskrbu električnom energijom pri naponu čija je kvaliteta sukladna propisima. Kako pri planiranju ne polazimo od ništice, barem u zemljama s dostignutim stanovitim stupnjem elektrifikacije, razvoj se zapravo svodi na planiranje potrebne i opravdane dogradnje prijenosne mreže. Pri planiranju razvoja prijenosne mreže moraju se uzeti u obzir opterećenja vodova i transformatora u toj mreži, opterećenja i proizvodnja elektrana, kao i potrebe svih drugih korisnika prijenosne mreže – distribucijskih mreža i izravnih kupaca[144] – koji su već priključeni ili će biti priključeni na prijenosnu mrežu u kratkoročnom, srednjoročnom i dugoročnom razdoblju (slika 20.1).

Pri tome, nužno je i općenito prihvaćeno dimenzioniranje rezerve u prijenosnoj mreži, sukladno kriteriju (n–1). Kriterij (n–1) u prijenosnoj mreži ispunjen je ako, nakon jednokratnog ispada 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 životne dobi opreme, (b) promjene ili prekida dugoročno ugovorenih prijenosa, (c) prekida opskrbe električnom energijom bilo kojeg korisnika mreže i (d) daljnjeg isključivanja jedinica elektroenergetskog sustava koje nisu izravno zahvaćene tim jednostrukim početnim događajem.

[143] development (engl.), Entwiklung (njem.); čest je akronim na engl. R&D = research and development = istraživanje i razvoj

[144] Pri tome, opterećenja u pojedinim čvorištima prijenosne mreže, najčešće se variraju prema očekivanim razvojnom scenarijima: očekivani (referentni) rast, ubrzani rast i – eventualno – usporeni rast. Za elektroenergetske sustave s relativno visokim udjelom hidroenergije, kakav je hrvatski sustav (u sadašnje vrijeme: približno 50% udjela hidroenergije u proizvodnji), nužna su razmatranja potrebnog razvoja prijenosne mreže uz varirane proizvodnje pojedinih hidroelektrana (postojećih i budućih) kakve se očekuju u prosječnoj, te vlažnoj i suhoj godini. Sukladno tome, variraju i proizvodnje postojećih i novih termoelektrana (u hidrološki suhoj godini zna biti potrebna dogradnja sustava s više dodatnih termoelektrana, koje su u vlažnoj godini podopterećene). Variraju i uvozno-izvozna opterećenja prijenosne mreže, u očekivanim granicama. U svim takvim slučajevima injektiranja u mrežu i evakuacije iz mreže određuju se najopterećenije jedinice mreže (vodovi i transformatori) te se tako dobivaju kandidati za dogradnju mreže, jer se dakako hipotetička mreža u tim računima dopunjuje zamislivim novim granama, to brojnijim što je vremenski obzor razmatranja udaljeniji od trenutka analize. Ako analiza ne daje napone pojedinih čvorišta mreže u povoljnim granicama ili se javljaju preopterećenja grana mreže, takva mreža dopunjuje se dodatnim jedinicama, kojima se rješavaju takva naponska stanja ili preopterećenja. Na koncu, kandidati za dogradnju mreže kontroliraju se prema profitabilnosti; izdvajaju se oni kandidati za dogradnju koji daju najveći odnos diskontinuiranih troškova vjerojatno neisporučene električne električne energije i drugih troškova u sustavu zbog njihove eventualne neizgradnje i anuitetnih investicijskih troškova njihove izgradnje tijekom duljeg razdoblja korištenja, recimo 15-30 godina. Uobičajena je i dodatna usporedba prema smanjenju gubitaka u mreži izgradnjom pojedinih kandidata za dogradnju.



Slika 20.1. Primjer određivanja tokova djelatne i jalove snage pri razvojnom sagledavanju prijenosne mreže

Ne treba isticati da je takvo razmatranje buduće mreže omogućeno samo oslanjanjem na računalo; za mrežu s recimo pedeset grana treba riješiti sustav jednadžbi s 50 nepoznanica, u 51 varijanti tog računa, jer treba sagledati tokove snaga u mreži uz pretpostavku ispada svake grane!

Ukažimo još i na to da se kriterij (n–1) primjenjuje ne samo pri sagledavanju potrebne dogradnje prijenosne mreže, nego i prilikom utvrđivanja tekuće sigurnosti prijenosne mreže. Primjerice, dispečer neće odobriti prijavljeno planirano isključenje nekog voda radi planiranih radova na tom vodu, ako mu razmatranje preostale raspoložive mreže ukazuje da ne bi bio ispunjen kriterij (n–1).

Razvoj i izgradnja prijenosne mreže, kao – uostalom – i razvoj čitave elektroprivrede, inherentan je pogonu i održavanju te iste mreže; nemoguće je zamišljanje funkcioniranja elektroprivrede *od-danas-do-sutra*. Elektroprivreda se mora neprekidno držati pogleda: smišljaj danas da bi mogao funcionirati prekosutra! Jer, prvo, stalan rast potreba za električnom energijom označava čitavo prethodno razdoblje i nema ikakve osnove za zamišljanje zaustavljanja tog rasta u predvidivom dugoročnijem razdoblju i, drugo, veliko je trajanje razdoblja od ideje do ostvarenja nekog prijenosnog objekta; to zna potrajati doista mnogo godina. Nemoguće je, nakon što smo ove godine utvrdili potrebu neke nove jedinice prijenosne mreže – da ona nagodinu bude u pogonu, kolikogod bila njezina izgradnja urgentna! U najmanju ruku, radi li se o dalekovodu, izgubit će se znatno vremena za rješavanje imovinsko-pravnih odnosa s postojećim korisnicima zemljišta i to se ne može nikako izbjeći.

Izgradnja prijenosne mreže

Pojmom *izgradnje*[145] obuhvaćaju se sve aktivnosti kojima se fizički, materijalno ostvaruje električno postrojenje ili dalekovod, od eventualno potrebnih studijskih radova radi razrade i razmatranja ideje o kandidatima za izgradnju, do ispitivanja nakon montaže i otklanjanja nedostataka. Pojam *građenje* uži je od izgradnje i obuhvaća građevinske i montažne radove u užem smislu.

Ponajprije, nužno je iznalaženje prostora za smještaj postrojenja ili za polaganje trase dalekovoda, određivanje lokacije. Ona mora biti prikladna za predstojeću izgradnju, za korištenje i održavanje u pogonu kao i za buduće sagledive ili eventualne dogradnje (vrlo je važno *ostavljanje rezerve* za buduće potrebe – makar danas i nesagledive). Projektni zadatak polazna je osnova za oblikovanje budućeg objekta i predstavlja početak aktivnosti u njegovoj izgradnji. Obvezni su geomehanički i geoelektrički podaci o tlu, hidrometeorološki i seizmički podaci. Traže se i uvjeti nadležnog državnog organa koje treba ispuniti prilikom namjeravane izgradnje, kao i uvjeti zatečenih drugih korisnika prostora na predviđenoj lokaciji objekta ili u njezinoj blizini (elektroprivreda, vodoprivreda, cestovni, rječni, željeznički i zračni promet, telekomunikacije, vojska, poljoprivredna i industrijska poduzeća, zaštićena prirodna ili povijesna područja).

Slijedi projektiranje, eventualno u više faza. Mora završiti projektom potrebnim za dobivanje građevinske dozvole. Za izrađeni projekt traže se suglasnosti i provodi se njegova kontrola, čega je sadržaj propisan zakonom. Izdavanjem građevinske dozvole, nadležni državni organ potvrđuje da su prethodni radovi obavljeni po propisima, prema pravilima struke i tako da objekt neće štetno djelovati na okolinu ili zatečene druge korisnike prostora, da će biti stabilan, pouzdan i kvalitetan, te da se namjerava graditi na prostoru na koji je stečeno pravo (prostor za koji su imovinsko-pravni odnosi riješeni). Ako su osigurana i financijska sredstva potrebna za izgradnju objekta, može se pristupiti građenju.

[145] construction (engl.), Ausbau (njem.)

Građenje počinje građevinskim radovima, a za veća gradilišta prethodnim uređenjem gradilišta i pristupa. Tijekom građevinskih radova odvija se dobava opreme, čija je isporuka ugovorena pravodobno. Oprema se preuzima kod ispručitelja i transportira na radilište. Građenje se nastavlja montažnim radovima kojima se oprema objekta koji se gradi, fizički sastavlja u cjeline prema projektu i, na kraju, električki povezuje (slika 20.2). Slijedi detaljno ispitivanje i pokusni rad objekta. Za omogućenje pogona izgrađenog objekta moguće su potrebni i zahvati na nekim drugim objektima u mreži; oni također trebaju biti pravodobno obavljeni.

Tehnički pregled izgrađenog objekta upriličuje nadležni državni organ, kako bi se utvrdila fizička usklađenost objekta s projektom i uvjetima iz građevinske dozvole i suglasnosti. Ako je potrebno, nalaže se otklanjanje nedostataka, iza čega slijedi izdavanje dozvole za upotrebu. Tada je dopušteno pogonsko korištenje objektom. Ako je za vođenje pogona predviđeno osoblje neposredno u postrojenju, ono je pravodobno trebalo biti izabrano, izobraženo i opremljeno osobnim sredstvima zaštite na radu.

Nužno je organizirano vođenje izgradnje, a za to zakon nalaže stalan nadzor, koji smiju obavljati samo ovlašteni radnici ili institucije. Zadaća je tog nadzora utvrditi zatečeno stanje na radilištu i njegovu usklađenosti s postavkama projekta (koliko se izvoditelj radova pridržava isključivo projektnih rješenja, koliko je ugrađeno materijala koji atestiranom kvalitetom odgovaraju zahtjevima projekta), pregledati i potpisati građevinski dnevnik, zabilježiti nalaz osobitih stanja i dopustivih odstupanja od projekta.

Nakon završetka izgradnje treba obaviti tzv. kolaudaciju koja predstavlja konačan financijski obračun svih troškova nastalih neposredno ili posredno u vezi s izgradnjom objekta. Tako dobivena vrijednost predstavlja vrijednosni parametar tog objekta, osnova je za uvrštavanje u osnovna sredstva njegova vlasnika i za obračun godišnje amortizacije te drugih veličina koje se temelje na vrijednosti osnovnih sredstava (npr. visina godišnje premije koju će potraživati osiguravatelj ako se postrojenje bude osiguravalo od štetnih događaja).

Slika 20.2. Obnova transformatorske stanice 400/110 kV *Ernestinovo, 2003.*

21

Pogon i održavanje prijenosne mreže

Granica između *pogona*[146] i *održavanja*[147] jedinica prijenosne mreže nije čvrsto određena. *Vođenje pogona* je skup aktivnosti za sigurno, tehnički opravdano i ekonomično korištenje ispravnim objektima prijenosne mreže ili njegovim dijelovima, a održavanje sadrži aktivnosti koje osiguravaju da sve jedinice mreže i tehnički sustavi budu ispravni (spremni, raspoloživi za pogon) u što duljem razdoblju, što se postiže redovitim održavanjem, odnosno da se intervencijama dovedu u takvo stanje, nakon što se ono iznenadno pokvarilo[148].

Pogon prijenosne mreže

Zadaće vođenja pogona prijenosne mreže su:

– sagledavanje predstojećih stanja u pogledu opterećenja i raspoloživosti jedinica mreže; tekuća raspoloživost može biti uvjetovana popravcima, remontima i dogradnjom mreže

– evidencija parametara jedinica mreže, sagledavanje mogućnosti tih jedinica i izrada uputa za pravilno korištenje

– evidencija pogonskih vrijednosti veličina (zapis mjerenja) koje određuju kakvoću i stupanj iskorištenja jedinica mreže, analiza i mjere za njihovo poželjno usmjeravanje, odnosno prilagođenje mreže trendovima tih vrijednosti

– periodički (dnevno-tjedno-mjesečno) nadzor svih jedinica mreže, radi pravodobnog uočavanja i prekida neželjenih stanja

– prilagođenje ugodivih parametara pojedinih jedinica mreže očekivanim ili iznenadno nastalim prilikama, primjerice rada zaštitnih, regulacijskih i automatskih uređaja

– opremanje radnika opremom za manipulaciju i zaštitnom opremom, te njihova izobrazba i provjera znanja o vođenju pogona, te opremanje potrošnim materijalom i pogonskim sredstvima

– manipulacije lokalnim ili daljinskim zahvatom kojima se mijenja uklopno stanje u mreži radi potreba normalnog pogona te manipulacije povodom smetnji i kvarova, radi uspostavljanja što povoljnijeg uklopnog stanja, uz izdvajanje jedinica u kvaru

– usklađivanje vremena potrebnih isključenja dijelova mreže radi preventivnih ispitivanja, održavanja ili popravaka između izvođača tih aktivnosti međusobno i s korisnicima mreže

– obavještavanje korisnika mreže o planiranim isključenjima radi radova na mreži

– stavljanje u beznaponsko stanje, osiguranje od uključenja, ispitivanje beznaponskog stanja, uzemljenje, ograđivanje i označavanje prije radova na isključenim dijelovima mreže

– stavljanje u pogon jedinica mreže nakon radova na tim jedinicama

– obaviještenost o pogonskim događajima, uz reakcije: (A)-hitna intervencija, jer je nastupio zastoj u isporuci električne energije ili on prijeti, ili jer treba zaustaviti daljnje nastajanje štete, otkloniti opasnost, (B)-nalog za zahvat u predstojećem razumnom vremenu,

---

[146] operation (engl.), Betrieb (njem.); čest je akronim na engl. O&M = operation and maintenance = pogon i održavanje

[147] maintenance (engl.), Instandhaltung, Unterhaltung, Wartung (njem.)

[148] Vođenje i održavanje kakva tehnička sustava mogli bismo slikovito usporediti s korištenjem automobila; vozač ga vozi (pogoni) a automehaničar ga održava, ali uz ne do kraja čvrstu granicu nadležnosti.

eventualno u kombinaciji s radovima redovitog održavanja i (C)-zahtjev da se zahvat učini bez čvrstog roka, odnosno da se izvedu preinake, dogradnje, zamjene i rekonstrukcije radi prilagođenja mreže novim ili nekim do tada neidentificiranim prilikama

– prijave šteta nastalih u mreži osiguravajućoj ustanovi radi naknade štete, ako je nastupio osigurani slučaj

– analiza uzroka, povoda i posljedica krupnih pogonskih događaja – osobito većih havarija ili nezgoda na radu – sagledavanje i provođenje mjera kojima se uzroci otklanjaju i smanjuje vjerojatnost povoda, kao i doseg, veličina i trajanje posljedica (fizičke preinake u mreži, dopune opreme za rad i zaštitu na radu, izmjene i dopune radnih procedura i dopune izobrazbe), te obaviještavanje svih zainteresiranih o tome

– prijem novoizgrađenih, dograđenih, zamijenjenih i rekonstruiranih jedinica mreže, ispitivanje prije puštanja u pogon i prvo puštanje u pogon

– učešće u formuliranju projektnih zadataka i revidiranje projekata za izgradnju, dogradnju i rekonstrukciju

– sagledavanje mogućnosti za nova priključenja ili opterećenja dijelova mreže, odnosno drukčiji način korištenja

– izrada tehničko-tehnoloških izvještaja (karakteristične vrijednosti mjerenih veličina, pregled pogonskih događaja i pregled stanja mreže) o pogonu i funkcioniranju mreže u proteklom (npr. jednogodišnjem) razdoblju, analiza, uspoređivanje s drugim mrežama ili s drugim razdobljem

– izrada plana rada za predstojeće (npr. jednogodišnje) razdoblje, sagledavanje potrebnih priprema jedinica mreže za neka nova korištenja i potrebnih sredstava za pogon, radnika i njihove opreme za rad i zaštitu na radu.

Vođenje pogona uvjetovano je instaliranim svojstvima jedinica mreže, instaliranom rezervom, svojstvima pomoćnog postrojenja, automatizacijom, mogućnošću daljinskog vođenja – s jedne strane. S druge strane, vođenje je uvjetovano ulogom jedinica mreže i njihovim svojstvima, te zahtjevima korisnika mreže, dakle kupaca i elektrana priključenih na mrežu (dnevni, tjedni i sezonski ritam potražnje odnosno moguće proizvodnje, osjetljivost na kvalitetu napona, te na broj ili/i trajanje prekida opskrbe električnom energijom).

Karakteristično je za pogonske događaje koji se manifestiraju u mreži, da im uzrok ponekad nije u mreži nego u drugim jedinicama elektroenergetskog sustava priključenim na mrežu; generatorima te postrojenjima i trošilima kod kupaca, a dosta događaja je uzrokovano djelovanjem iz okoline (atmosferske prilike, drugi objekti ili aktivnosti ljudi u blizini jedinica mreže). Događaja ima više na vodovima (pogotovo nadzemnim), nego na drugim jedinicama elektroenergetske mreže. U pravilu, više je planiranih događaja nego li iznenadnih. Dio iznenadnih događaja su prolazne smetnje, koje bez trajnog kvara nestaju nakon kratke ili trominutne beznaponske pauze, opet najviše na nadzemnim vodovima (preskok uz električni luk koji se gasi isključenjem napona, izazvan npr. vlagom kondenziranom na izolacijskoj površini, ili premoštenjem granom ili tijelom životinje ili ptice).

Daljinsko vođenje pogona

Za suvremeno rješenje vođenja pogona karakteristično je daljinsko upravljanje, daljinsko vođenje pogona, kojemu je svojstven:

– uvid u stanje mreže u realnom vremenu, dakle uvid u stanje bez zakašnjenja prema vremenu nastupa tog stanja (promjena položaja aparata, javljanje alarma, vrijednosti mjerenih veličina)

– mogućnost djelovanja povodom nastalih stanja ili radi prilagođavanja uklopnog stanja ili regulacije prema očekivanim prilikama (upućivanjem upravljačkih ili regulacijskih naloga u postrojenja)

– sagledavanje prilika u većem broju čvorišta mreže na jednom mjestu, u centru daljinskog vođenja, i provođenje tih odluka, bez odlaganja, u svim čvorištima mreže – što je svojstveno potrebama pogona mreže, naime istodobno i simultano djelovanje u brojnim čvorištima većeg dijela međusobno povezane mreže, koji su topografski udaljeni (i više stotina kilometara)

– sagledavanje predstojećih prilika estimacijom (procjenom) stanja na računalu, na osnovi (a) tekuće konfiguracije raspoložive mreže i predvidivih prilika u predstojećem razdoblju, (b) tekućih trendova opterećenja i drugih relevantnih parametara (npr. temperature okoline) i (c) razmatranje mogućih uklopnih stanja i angažmana elektrana, kompenzacije jalove snage te utjecaja na potrošnju (*upravljanje potrošnjom*), kako bi u svakom trenutku bila zadovoljena potražnja, uz odgovarajuću kvalitetu, pouzdanost i ekonomičnost

– utemeljeno određivanje prioriteta angažiranja ekipa za održavanje, osiguranjem nužnog uvida u stanje na širem području

– utemeljeno odobravanje isključenja dijelova mreže radi radova planiranog održavanja i odlučivanje o potrebi hitnog prekida tih radova zbog iznenadnih prilika

– središnje prikazivanje i pohranjivanje mjernih vrijednosti i kronologije pogonskih događaja (dojava o promjenama uklopnih stanja i nastupa alarmnih stanja), izrade rutinskih izvještaja i/ili izvještaja po potrebi i njihovih analiza.

Održavanje prijenosne mreže

Održavanje jedinica prijenosne mreže naglašeno je okrenuto preventivi u odnosu na kurativu; nastoji se da u što duljem razdoblju ne dođe do prisilnog, neplaniranog zastoja, a pogotovo kvara (trajnog zastoja) nijedne komponente bitne za opskrbu električnom energijom (slika 21.1). To se postiže organizacijom održavanja koja obuhvaća:

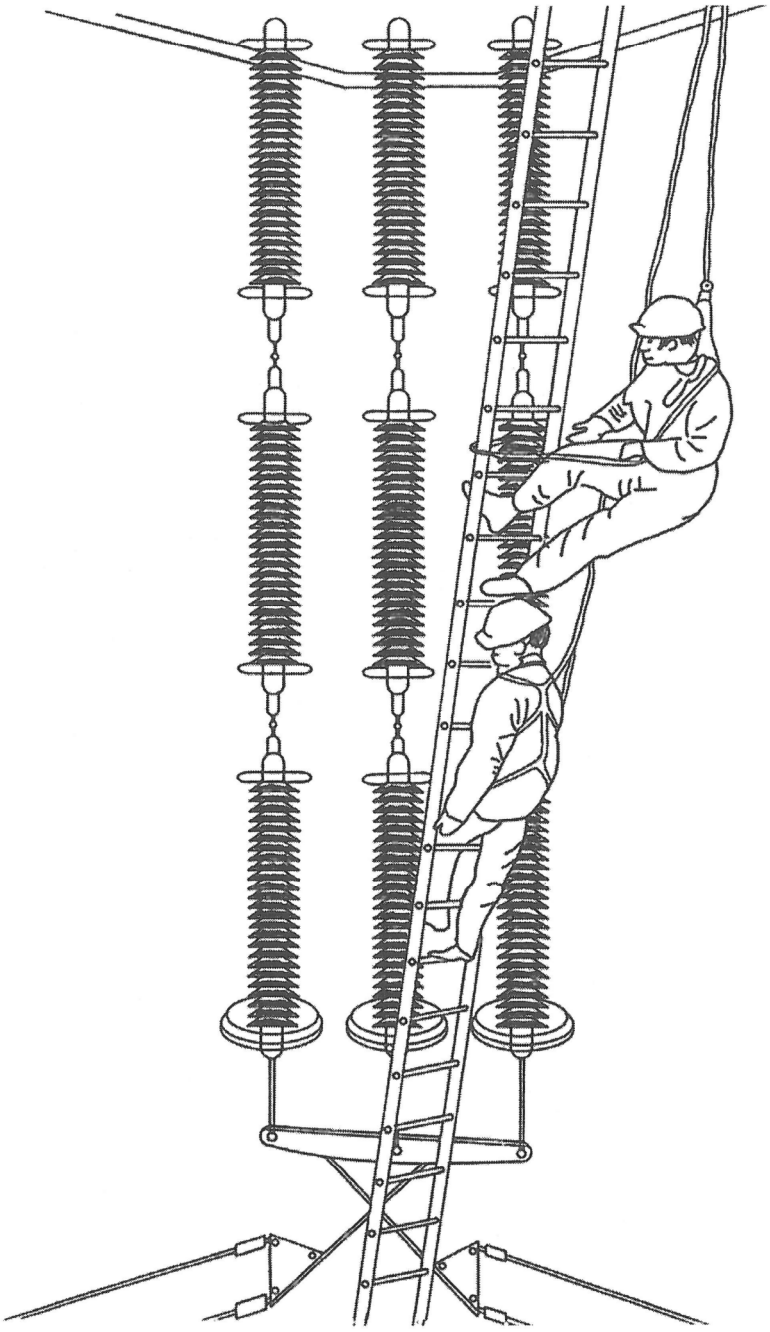
– *preglede*, kojima se utvrđuje stanje jedinica mreže bez prekida pogona ili se obavljaju preventivna ispitivanja[149] (koja sprečavaju potencijalne kurativne zahvate), eventualno uz planirani, u pravilu relativno kratkotrajan, prekid pogona

– *revizije*, kojima se u višemjesečnim do višegodišnjim ciklusima (ili cikluse određuje intenzitet korištenja) – uz planiran prekid pogona – otvaraju/rastavljaju dijelovi bitni za funkcioniranje, utvrđuje njihovo stanje, zamjenjuju po potrebi, dotjeruju, čiste-podmazuju-ugađaju, provjerava pravilno funkcioniranje i dovodi u pogonsko stanje

– *remonte*, kojima se u višegodišnjim ciklusima – uz dugotrajniji prekid pogona – obavljaju krupni zahvati kojima se produljuje životni vijek (obnavlja zaštita od korozije, regenerira transformatorsko ulje, potpuno zamjenjuju neke komponente ili sklopovi novima, provode ispitivanja dotrajalosti).

Ponegdje, dodaje se takvoj sistematizaciji održavanja i *njega*; za neke komponente ili podsustave – uz kratkotrajan prekid pogona (ili bez prekida pogona), manji rutinski zahvat (npr. podmazivanje ili dopunjavanje pogonskim sredstvom) koji u pravilu izvodi osoblje koje vodi pogon, kao sastavni dio periodičkih pregleda (npr. dnevni i tjedni pregled).

[149] Nabrojimo samo neka preventivna ispitivanja koja se provode u prijenosnoj mreži: termovizijsko ispitivanje zagrijanosti opreme u pogonu, kromatografsko ispitivanje transformatorskog ulja, utvrđivanje parcijalnih izbijanja u mjernim transformatorima osluškivanjem ultrazvuka.



Slika 21.1. Rad na održavanju dalekovoda 380 kV *u Njemačkoj*

Upozoravajući nalaz preventivnih ispitivanja mora se otkloniti bez odgađanja, čak ako zahtijeva – ali planirani, unaprijed najavljeni – zastoj u isporuci električne energije; svrha i jest izbjegavanje iznenadnog zastoja i veće štete.

Preventivno održavanje (pregledi i preventivna ispitivanja, revizije i remonti) izvodi se po planu održavanja (donesenom najčešće za jednogodišnje razdoblje i operacionaliziranom najčešće tjedno), a taj se donosi prema propisima, uputama isporučitelja opreme, internim pravilima, stvarnom stanju u postrojenju, okolnostima pogona i očekivanim prilikama. Plan se usklađuje između svih korisnika mreže te s remontima drugih postrojenja, elektrana, industrijskih pogona, s godišnjim odmorima poduzeća i ustanova priključenih na mrežu.

Za efikasnu provedbu plana održavanja nužno je: (a) pravodobno osiguranje rezervnih dijelova i materijala potrebnog za održavanje, (b) pravodobni angažman specijaliziranih izvođača ili raspolaganje vlastitim izobraženim radnicima, uz (c) osiguranje sredstava za rad (alat, pomagala, oprema za rad, mehanizacija, sredstva zaštite na radu) i (d) raspolaganje procedurama za održavanje (što treba učiniti, u kojem slučaju ili kada i kako).

Presudno je pravodobno osiguranje rezervnih dijelova, najčešće u tekućoj godini za poslove koji se planiraju izvoditi u idućoj godini. Nedostatak specijaliziranih rezervnih dijelova praktički je operativno nenadoknadiv, jer je rok njihove isporuke najčešće relativno velik.

O nađenom stanju preventivnim ispitivanjem i/ili pri preventivnom održavanju mora se voditi sustavna evidencija, kao i o učinjenim zahvatima i utrošenim sredstvima. Mora se evidentirati novo stanje, osobito pomno ako novo stanje ne znači punu raspoloživost ali omogućuje pogon (uz stanovite uvjete i ograničenja). Mora se osigurati obaviještenost vođenja pogona o tome i odgovornost za dovođenje u potpuno normalno stanje.

Naglašena treba biti osjetljivost prema eventualno uočenu sustavnom nedostatku na stanovitoj vrsti opreme, nekom sklopu ili nekom dijelu. Ukoliko je nedostatak takav da ugrožava pogon i/ili prijeti štetom, bez odlaganja se mora preurediti plan održavanja i sustavno otkloniti takav nedostatak na svim mjestima, uz obavještavanje isporučitelja o tome, radi njegova angažmana i radi zaštite drugih korisnika takve opreme.

Hitne intervencije, čija potreba nastupa iznenadno, također odgađaju redovno odvijanje plana održavanja barem za neke radnike i ekipe ili opremu za rad, uz cijenu da započeti redoviti rad prekinu i usmjere svoj rad ili korištenje opremom na hitniju zadaću. Vođenje pogona, sagledavajući stanje u mreži, rangira izvanredne-neplanirane zadatke održavanja prema prioritetu A-B-C, kako je ranije rečeno (A=neodgodivo, B=donekle odgodivo i C=odgodivo).

Radove na električnim rasklopnim postrojenjima i dalekovodima visokog napona organizacijski treba urediti tako da ih ekipa za održavanje *pismeno* preuzima uz isključenog-osiguranog od uključenog-uzemljenog stanja i – nakon završetka radova, dovođenja u funkcionalno stanje, uklanjanja svih sredstava za rad i svih ljudi s mjesta rada – *pismeno* predaje vođenju pogona uz obavijest o punoj ili ograničenoj spremnosti za pogon.

Održavanje se potpomaže, u suvremenom provođenju, kompleksnom računalnom podrškom. Ona obuhvaća sve podatke o ugrađenoj opremi, zahtjeve pravila održavanja, normative resursa potrebnih za održavanje, omogućuje planiranje, izdavanje naloga za izvršenje plana, izradu pismenih naloga za neposrednu provedbu, izvještavanje, evidenciju, statistiku (osobito o svojstvima pojedinih tipova opreme), analizu i stvaranje podloga za planiranje za naredno razdoblje, nabavu materijala, nužnost zamjene i kupovinu nove opreme, korekcije pravila održavanja (osobito u pogledu rokova održavanja i postupaka povodom nalaza preventivnih ispitivanja – jer je za to mjerodavno upravo sustavno praćeno iskustvo), izobrazbu, plaćanje i nagrađivanje. Međusobnim komuniciranjem, na širem području, više jedinica održavanja može usklađivati vrijeme velikih zahvata, ispomažući se u ekipama, mehanizacijom, radnom opremom, rezervnim dijelovima i stručnjacima.

Najbolje jednom godišnje, ili za višegodišnje razdoblje, treba načiniti izvještaj o održavanju koji treba sustavno prikazati planirane i izvršene (prema planu i neplanirane) poslove održavanja, utrošene rezervne dijelove i materijal, te drugo. Uočiti treba, za pojedine vrste i isporuke komponenata mreže u kojoj se fazi vijeka trajanja nalaze (da li je završeno početno razdoblje i ima li još otvorenih poteškoća početnog razdoblja,

najavljuje li pojačani intenzitet kvarova stanje istrošenosti-dotrajalosti). Također treba uočiti eventualne sustavne nedostatke pojedine opreme, ali i neadekvatnu ili čak nepraviln uporabu i nedopušteno opterećenje u pogonu. Izvještaj mora sadržavati analizu koja će ukazivati na dobra i loša iskustva u održavanju u proteklom razdoblju te ukazivati na glavne pravce poboljšavanja.

Takav izvještaj osnova je za dotjerivanje pravila o vođenju pogona, pravila održavanja, korekciju lista minimalnih količina rezervnih dijelova, tretman preventivnih nalaza, orijentaciju pri izboru tipa opreme i isporučitelja za buduće izgradnje, dogradnje ili zamjene opreme u mreži.

Pravila održavanja moraju sadržavati, za svaku vrstu opreme koju sadrži mreža, pojedinačne zahvate koje treba izvesti pri održavanju i periodičnost pojedinog zahvata (ili drugi uvjeti za nužnost zahvata, npr. broj manevara, broj sati rada, kvantificirani nalaz preventive), te opis zahvata, s popisom dijelova i materijala koji treba koristiti, alata, pomagala i sl.

Zaštita na radu

Zaštita od električnog udara izvodi se onemogućavanjem slučajnog dodira dijelova pod naponom i/ili ograničenjem vrijednosti i trajanja struje koja bi prolazila kroz tijelo čovjeka pri dodiru dijelova mreže koji normalno nisu pod naponom, ali bi mogli doći pod napon pri neispravnostima i poremećajima u postrojenju ili na vodovima.

Hrvatskim propisima dopušten je izmjenični dodirni napon 50 V. Toliki napon trajno je dopušten; ako je vrijeme isključenja kraće, dopušta se veći dodirni napon, razlikujući prostor unutar i izvan postrojenja. Primjerice, ako je vrijeme isključenja jednako ili manje od jedne sekunde, u postrojenju dopušten je dodirni napon 125 V. Postrojenja i vodovi moraju biti tako konstruirani i izvedeni, osobito sustav uzemljenja i zaštite, da se ne može pojaviti veći dodirni napon, i njegovo trajanje, od dopuštenih. Dopušteni istosmjerni dodirni napon je 120 V.

Onemogućenje slučajnog dodira u postrojenjima i vodovima postiže se izoliranjem, oklapanjem i ostvarivanjem sigurnosnih razmaka (visina i udaljenosti) od nezaštićenih dijelova pod naponom. Najmanji dopušteni razmaci osiguravaju da ne dođe do slučajnog dodira dijelova pod naponom, pri postupcima kod nadzora i vođenja pogona. Međutim, pri zahvatima održavanja, potrebno je pristupiti i dijelovima koji su u pogonu pod naponom. Prostori postrojenja i vodova u tom se pogledu dijele na zone opasnosti:

– I zona – zona slobodnog kretanja; pristupni putevi, opći hodnici i prostorije, opći pristupačan prostor ispod dalekovodnih vodiča

– II zona – zona ograničenog kretanja, dopušteno samo uz dozvolu i uz pratnju ovlaštenog radnika; prostor izvan ćelija unutarnjih postrojenja, odnosno do gornjeg ruba uzemljene prirubnice aparata vanjskih postrojenja (2,3 metra od tla) ili na dalekovodnom stupu do visine 1,15 metara za vodove napona 110 kV od najnižeg vodiča, 2,3 m (220 kV) odnosno 3,4 m (400 kV)

– III zona – zona nedopuštenog pristupa, ulazak dopušten samo uz dozvolu za rad, prethodno provođenje mjera osiguranja mjesta rada, potpis dokumenta o tome i prisustvo barem dva radnika; prostor u ćelijama, iznad uzemljene prirubnice, odnosno u glavi stupa – iznad II zone.

Mjere osiguranja mjesta rada u III zoni opasnosti (*pet pravila sigurnosti* na radu u električnim postrojenjima):

1. isključi
2. osiguraj od uključenja
3. provjeri beznaponsko stanje
4. uzemlji
5. ogradi i označi

Nakon završetka rada u III zoni opasnosti, odgovorni rukovodni radnik utvrđuje da je postrojenje ili vod ponovno u stanju spremnom za pogon, da su svi radnici napustili zonu opasnosti, da su sav alat i pomagala, privremeni uzemljivači i kratkospojnici na mjestu rada uklonjeni i to pismeno izjavljuje uz potpis. Nakon toga isključuje se uzemljenje, uklanja osiguranje od uključenja i time dovodi do spremnosti za uključenje.

Tipičnu električnu opasnost predstavljaju radovi koji nesmotreno mogu dovesti do opasnog električnog približavanja ili dodira dijelova pod naponom:

– nošenje predmeta duljih od jednog metra

– pucanje i/ili odskok vodiča koji se neoprezno zateže, provlači, odmata, namata, polaže u postrojenju ili u blizini dalekovoda.

Zaštita je potrebna i od neelektričnih opasnosti pri radu:

– opasnost od neadekvatne odjeće i obuće (zapinjanje, sklizanje)

– opasnost pri korištenju ljestvama i skelama

– opasnost od rada na visini većoj od 1,5 metra i od pada u dubinu

– opasnost od pada predmeta s visine na tijelo radnika

– opasnost od krhotina koje bi bile posljedica eksplozije elementa postrojenja u kojem je došlo do električnog luka.

Kao obvezna mjera zaštite od posljednje nabrojane opasnosti, boravak u rasklopnom postrojenju visokog napona (u II i III zoni) iz bilo kojeg razloga, *nije dopušten bez primjene zaštitne izolacijske kacige.* Za zaštitu od ostalih opasnosti primjenjuju se propisana zaštitna sredstva: izolacijske rukavice i obuća, zaštitni pojas, izolacijske motke i kliješta, motke za ispitivač napona, privremeni uzemljivači, izolacijske pregrade i prostirke, zaštitne ograde i drugo.

Rad pod naponom

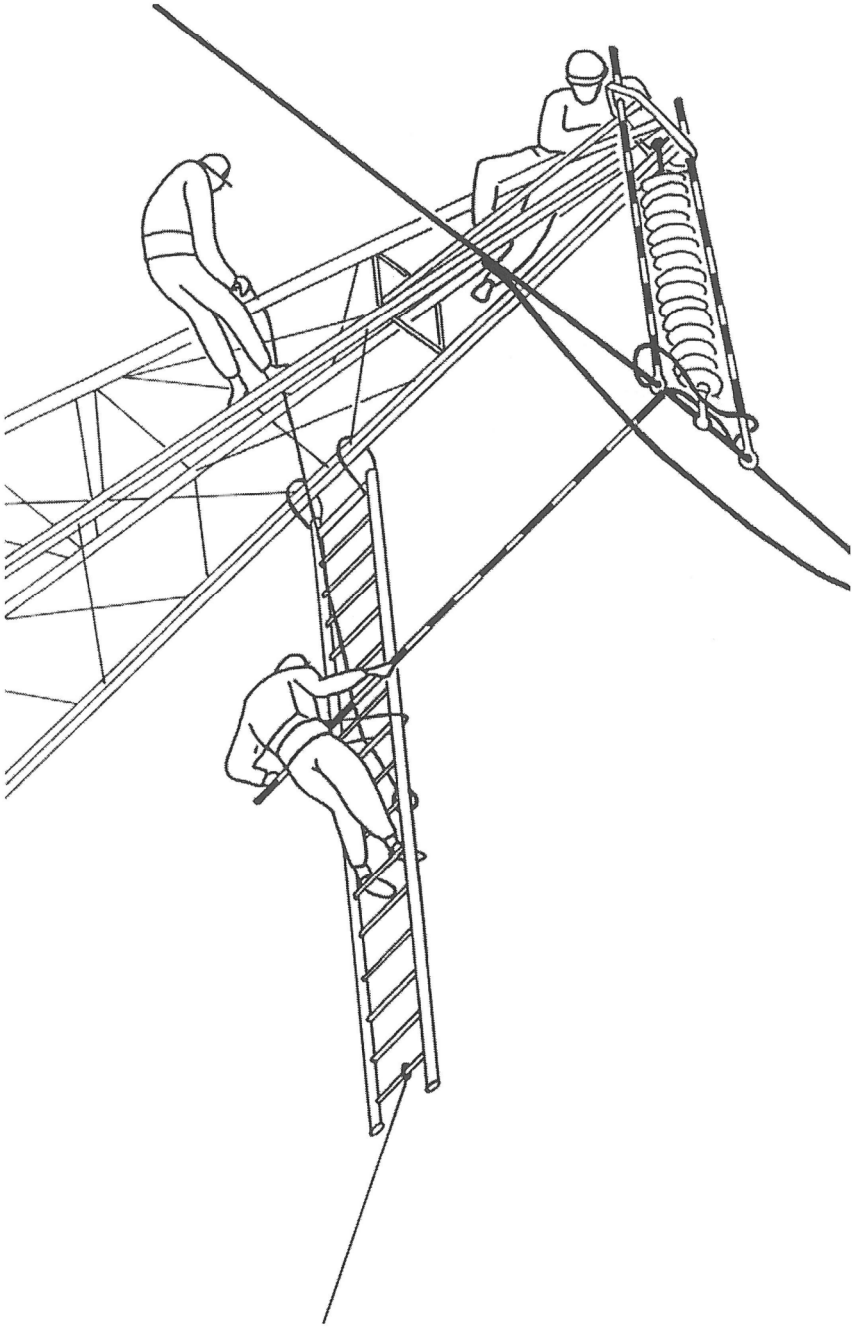
Osobit način izvođenja radova na jedinicama mreže je *rad pod naponom (RPN)*[150]. RPN je izvođenje nadzora, održavanja, popravaka, zamjena, rekonstrukcija ili dogradnje vodova i postrojenja bez prekida njihova pogona. RPN vodi izravno povećanju raspoloživosti prijenosne mreže, jer se smanjuje broj planiranih zastoja jedinica mreže. Vodi i povećanju sigurnosti pri radu, jer je takav rad vrlo pažljivo organiziran, osigurana mu je ozbiljno provjerena oprema, izvode ga radnici provjerene sručnosti i zdravstvene sposobnosti, a psihološki se odvija prema sloganu: "Bolje da znam da je pod naponom, nego li da sam (moguće lažno) uvjeren da je isključeno!" U svjetskim i europskim elektroprivredama, intenzivnija primjena RPN-a odvija se od pedesetih i šezdesetih godina prošlog stoljeća.

[150] LiW = live working, ponekad i hot-line-work (engl.), AuS = Arbeit unter Spannung (njem.)

Pri RPN-u primjenjuje se jedan od sljedećih postupaka, ili njihova kombinacija:

– *rad uz dodir*[151] (uporabom izolacijskih rukavica i pomagalima, dolazi u obzir samo na niskom i srednjem naponu)

– *rad na razmaku*[152] (korištenjem alatima – na izolacijskim motkama dovoljne duljine; primjenjuje se pri naponu do 110 kV, jer bi za više napone motke bile preduge i time neprikladne za rukovanje) (slika 21.2).



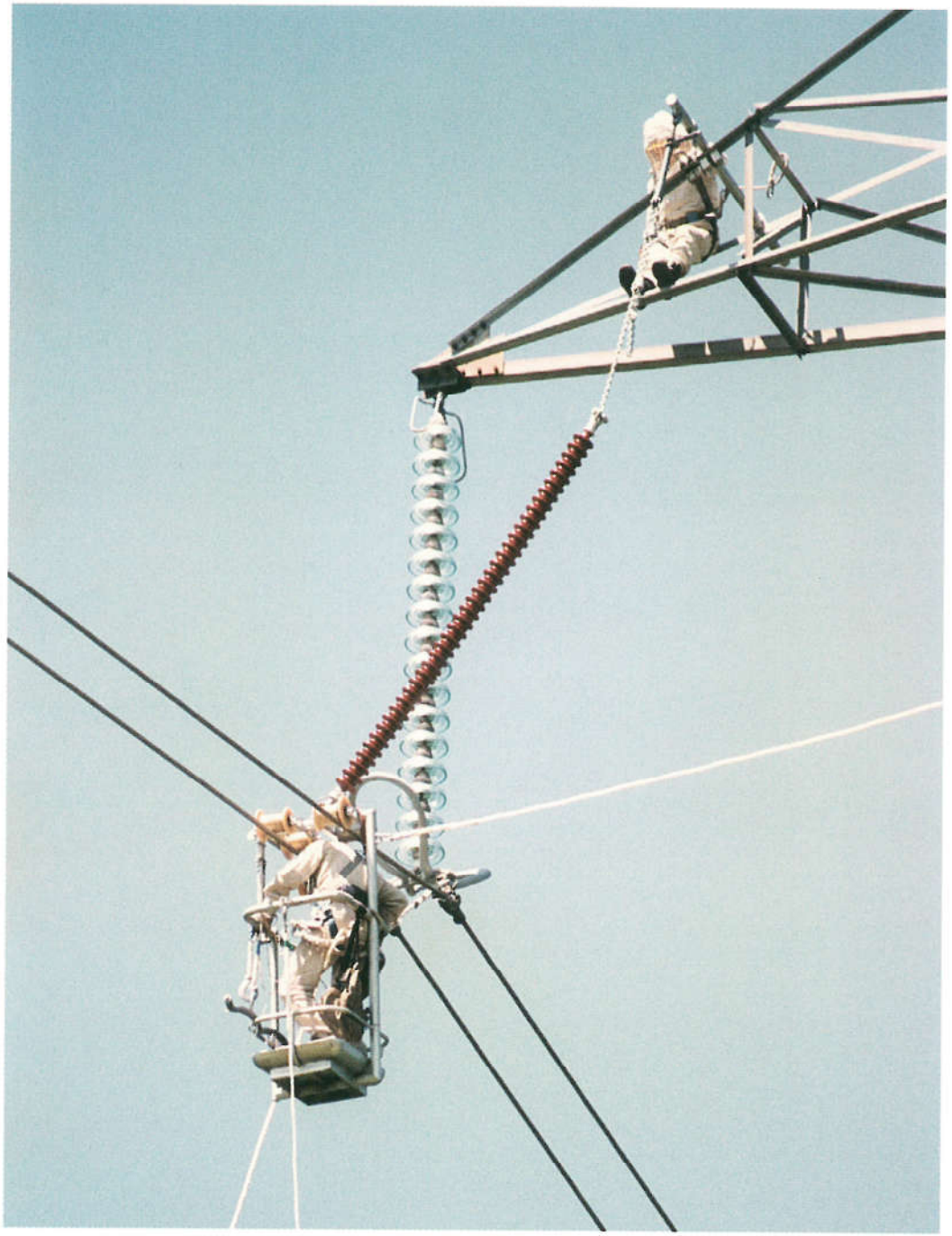
Slika 21.2. Rad pod naponom metodom na razmaku

[151] rubber glove working (engl.)

[152] hot stick working (engl.)

– *rad na potencijalu*[153] (radnik na faznom potencijalu, pouzdano udaljen od uzemljenih mjesta; primjenjuje se pri najvišim naponima, jer su tu razmaci dovoljno veliki da se može ostvariti potrebna udaljenost između radnika na faznom potencijalu i uzemljenih dijelova) (slika 21.3).

Takav rad može se provoditi samo ako je propisima dopušten, te pod uvjetima, u obuhvatu i na način kako je dopušten.



Slika 21.3. Rad pod naponom na vodu 400 kV *metodom na potencijalu*

[153] bare hand working (engl.)

22

Raspoloživost jedinica prijenosne mreže

Elementarno svojstvo svake bitne jedinice prijenosne mreže, svakako pojedinih vodova i transformatora, njihova je dopuštena opteretivost u pojedinim uvjetima pogona, dakle dopuštena snaga kojom trajno smiju biti opterećeni. Eventualno je poznata i dopuštena snaga kojom smiju biti preopterećeni u ograničenom trajanju, ovisno opet o nekim uvjetima, ponajprije o prethodno postignutom opterećenju. Uvjeti dopuštenog opterećenja su ponajviše određeni temperaturom okoline i brzinom vjetra. Naime, dopušteno je opterećenje ograničeno postignućem određene temperature jedinice mreže a ta je ovisna o temperaturi okoline[154] i odvođenju topline. Viša temperatura okoline snizuje dopušteno opterećenje, jer preostaje manja razlika temperature za zagrijavanje do dopuštenog, a jači vjetar povisuje dopušteno opterećenje, jer povećava odvođenje topline. Tekuće postignuta nadtemperatura ovisna je o kvadratu tekućeg opterećenja (dakle dvostruko opterećenje vodi četverostrukoj nadtemperaturi), a brzina postizanja te nadtemperature ovisi o toplinskoj vremenskoj konstanti jedinice mreže. Što je tijelo koje se zagrijava masivnije, to je brzina porasta temperature manja, i obrnuto.

Za neko vremensko razdoblje u kojem bi dopušteno opterećenje bilo stalno, maksimalna energija koju bi bilo moguće prenijeti tom jedinicom mreže je dopušteno opterećenje pomnoženo s brojem sati u tom razdoblju. Pretpostavimo li tijekom cijele godine stalno dopušteno opterećenje, maksimalna energija dobila bi se množenjem te snage i 8760 sati.

Ostvareno opterećenje jedinice prijenosne mreže svakako mora biti ispod dopuštenoga (inače bi jedinica bila isključena iz pogona, automatskim djelovanjem zaštite), ponekad je i znatno niže od dopuštenoga. Ostvareno godišnje iskorištenje prenesenom energijom za neke jedinice mreže pogotovo može biti znatno niže od maksimalnog. Razlog tome je u primjeni kriterija (n–1) pri korištenju mrežom; neka jedinica mreže mora biti u pogonu bez obzira što je u normalnim pogonskim prilikama njezino opterećenje malo ili čak nikakvo, da bi u izvanrednim prilikama – pri iznenadnom zastoju neke druge jedinice mreže, osigurala opskrbu svih potrošačkih čvorišta u mreži, kao da do tog zastoja nije došlo.

Raspoloživost i neraspoloživost

Zbog toga nije dovoljno poznavanje samo opterećenja jedinica prijenosne mreže, čak nije niti najbitnije (jer su jedinice ionako opterećene do dopuštenog opterećenja), nego je za promatrani pogon mreže u prošlosti ili za sagledavanje mogućnosti pogona u budućnosti bitnije poznavanje *raspoloživosti*[155] jedinica mreže, dakle vjerojatnosti da je jedinica bila raspoloživa za pogon (bez obzira kojim opterećenjem, dakako do dopuštenoga) ili da će biti raspoloživa za pogon, štoviše koristili mi nju ili ne, i ma koliko je koristili.

Idealno bi bilo kada bi sve jedinice mreže bile raspoložive cijele promatrane godine, tada bi raspoloživost svih jedinica bila 100 posto. Realno nije tako; jedinice mreže izložene su – u pravilu neizbježnim – *zastojima*[156]. Neraspoloživost može, ili čak mora, biti izazvana plani-

[154] Donekle i o osunčanju, radi li se o nadzemnim vodovima ili vanjskim postrojenjima, jer veće osunčanje dovodi do većeg upijanja (apsorpcije) topline Sunčeva zračenja i time podizanja temperature vodiča.

[155] availability (engl.), Verfügbarkeit (njem.)

[156] outage (engl.), Unbrauchbarkeit (njem.)

ranim zastojem radi provođenja obveznog održavanja, revizije, koja je propisima pojedine države zadana i ne može se izbjeći. Najčešće, to je propisano održavanje orijentirano rokovima, kada se zahtijeva revizija najmanje jednom u propisanom razdoblju, često je to godina dana, ali može biti i kraće i dulje. Tako je u okolnostima hrvatskih propisa. U suvremenom pristupu napušta se održavanje prema rokovima i okreće se održavanju prema stanju pojedinih sastavnica mreže. Prema takvom pristupu je trenutak izvođenja obvezne revizije određen ostvarenjem kakva kvantificirana a upozoravajuća stanja, ili kakva kumuliranog korištenja. Bez obzira na trajanje koje je proteklo od posljednje revizije. U svakom slučaju, mora doći do planiranog zastoja jedinice prijenosne mreže, osim kada je omogućen zahvat metodom rada pod naponom. U više godina uzastopno, moguće je takve zastoje statistički homogenizirati i time omogućiti da ih se predvidi u budućnosti.

Neraspoloživost jedinice mreže slijedi i zbog prisilna, iznenadna, neplanirana zastoja koji se neizbježno javlja kao posljedica grešaka u materijalu, atmosferskih prilika, pogrešnog djelovanja zaštitnih uređaja, neočekivanog preopterećenja, pogrešaka osoblja, ..., trenutak kojih nastupa je nemoguće predvidjeti, ali ih je statistički također moguće obraditi iz prošlosti i time sagledavati očekivanja za neko promatrano buduće razdoblje.

Neka mreža ima raspoloživije a druga manje raspoložive jedinice. Ovisi to o osnovnoj strukturi mreže (da li zastoj jedne jedinice povlači za sobom i zastoj neke druge, nekih drugih jedinica), o stanju izgrađenosti mreže (da li u mreži ima dovoljno ugrađene rezerve ili većina jedinica *vozi po rubu*), o kakvoći opreme ugrađene u mrežu (dakle da li se ugrađuje samo provjerena oprema osvjedočeno dobrih proizvođača), o prosječnim atmosferskim prilikama (vlažnost zraka, zaleđivanje, vjetar, posolica, grmljavina, ...) o kakvoći vođenja pogona i – vrlo naglašeno – o kakvoći održavanja, tc o načinu održavanja (prema rokovima ili prema stanju, veći ili manji udio radova pod naponom).

U mnogim svjetskim elektroprivredama ustaljeno je statističko praćenje pogonskih događaja već mnogo desetljeća, najčešće u jednogodišnjem ritmu, koje omogućuje kvantificirano iskazivanje podataka o ostvarenoj raspoloživosti. Nije još utvrđeno jedinstveno klasificiranje i atribuiranje svih pojava, te su usporedbe među državama često otežane; razlog tome je zatečena praksa u pojedinim državama, pa nitko nije voljan poremetiti *svoj* statistički višegodišnji niz, smatrajući ga dakako najboljim.

Ipak, navedimo i protumačimo neke osnovne pojmove kako ih pretežno sagledava praksa *statistike pogonskih događaja*[157] u mnogim zemljama.

Statistika pogonskih događaja

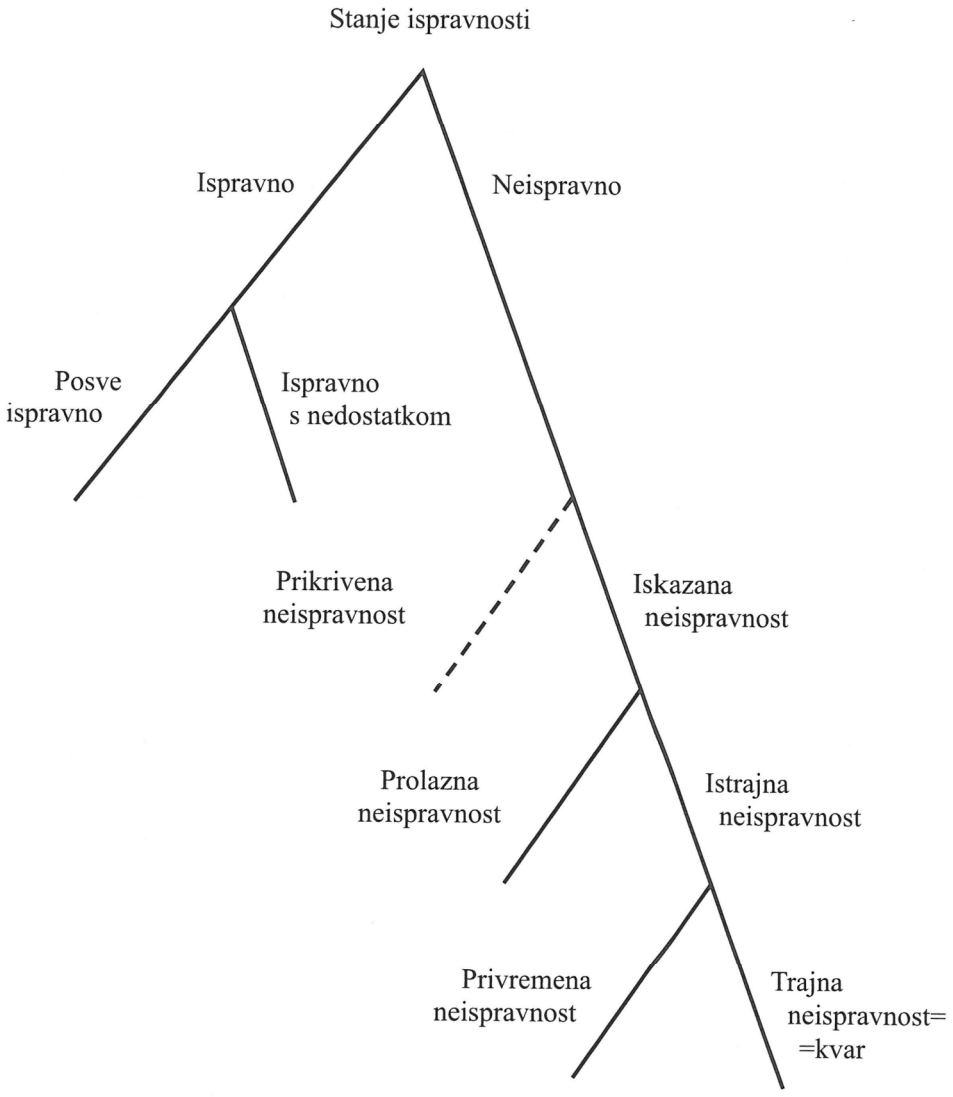
Promatrane jedinice u statistici pogonskih događaja mogu biti pojedine jedinice promatrane mreže po vrstama: nadzemni vodovi, kabelski vodovi, nadzemno-kabelski vodovi (ili svi vodovi promatrani zajedno), transformatori, te polja i sabirnice (u rasklopnim postrojenjima) ili neke zbrojene kombinacije tih jedinica ili sve jedinice uzete zajedno. Najčešće je razvrstavanje promatranih jedinica prema nazivnom pogonskom naponu mreže u kojoj su korištene. *Količine* svake od vrsta promatranih jedinica u mreži iskazuju se brojem jedinica (komadi), a količina vodova u mreži još i duljinom (kilometri). Naime, neki su događaji razmjerni broju jedinica (npr. pogrešnim manipulacijama osoblja), a nekim događajima svojstvena je izloženost duljinom vodova (npr. atmosferskim električnim pražnjenjima).

[157] unavaliability statistics (engl.), Störungsstatistik (njem.)

Promatrano razdoblje je najčešće jedna kalendarska godina, a prate se pogonski događaji na onim promatranim jedinicama koje su bile u korištenju pod istim pogonskim nazivnim naponom tijekom čitave promatrane godine, ili neko kraće ali specificirano razdoblje.

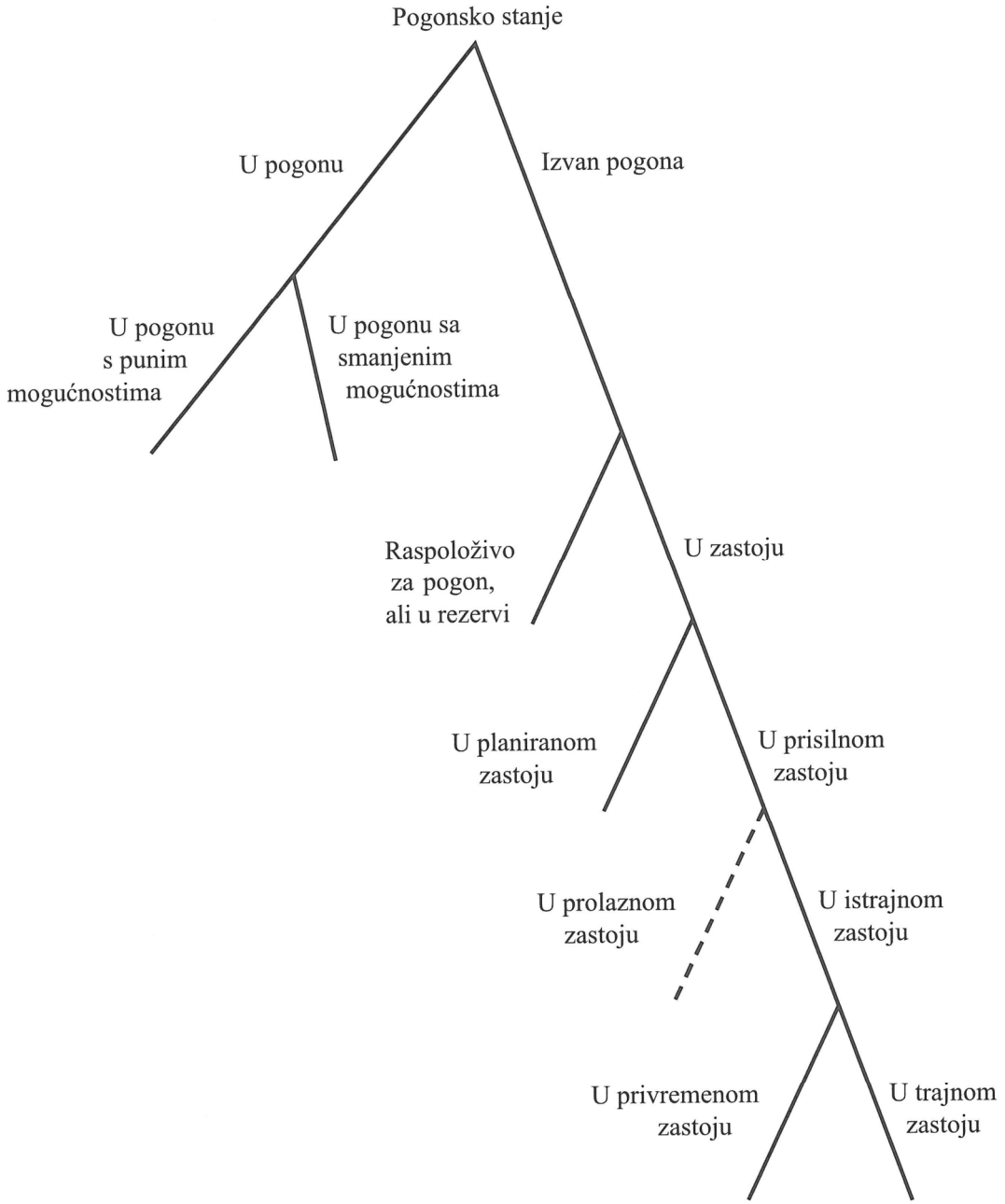
Promatrana *stanja*[158] jedinica u mreži vremenski su određena početnim i završnim *događajem*[159]. Događaje obilježava vrijeme njihova nastupa, a stanja obilježava njihovo trajanje (razlika vremena nastupa završnog i početnog događaja). Događaj mijenja stanje promatrane jedinice.

Stanja promatranih jedinica sagledavaju se s dva stajališta: prema stanju ispravnosti (*ispravno-neispravno*[160]) i prema pogonskom stanju (*u pogonu-izvan pogona*[161]). Pri korištenju mrežom, svaka promatrana jedinica može se naći u jednoj od zamislivih kombinacija tih stanja: ispravna+u pogonu, ispravna+izvan pogona, neispravna+u pogonu, neispravna+izvan pogona (slike 22.1. i 22.2).



Slika 22.1. Stanje ispravnosti jedinice mreže

[158] state (engl.), Zustand (njem.)
[159] occurrence (engl.), Ereignis (njem.)
[160] up state-fault state (engl.), fehlerfrei-Fehlzustand (njem.)
[161] in service-non operation (engl.), in Betrieb-aus Betrieb (njem.)



Slika 22.2. Pogonsko stanje jedinice mreže

Pojave koje u pravilu promatra statistika pogonskih događaja su *izvanpogonska stanja* promatranih jedinica: (a) uz neispravno stanje te jedinice, (b) uz ispravno stanje te jedinice – ako je izvanpogonsko stanje izazvano neispravnim stanjem koje druge jedinice promatrane mreže ili povezane nepromatrane mreže, te (c) ako je izveden planirani isklop radi planirana zastoja.

Pogonsko stanje neispravne jedinice nije predmet statistike pogonskih događaja, sve dok takva jedinica ne dođe (i tek ako dođe) u izvanpogonsko stanje. Dakako, i izvanpogonsko stanje raspoložive jedinice koja je smišljeno stavljena *u rezervu*[162], također ne obuhvaćamo

[162] reserve outage (engl.), in Bereitschaft (njem.)

tom statistikom. Jedinica može imati *nedostatak*[163], uz takvo stanje jedinica je u pogonu, ali sa smanjenim mogućnostima (primjerice pri kvaru rashladnog ventilatora transformatora, moguć je pogon tog transformatora, ali uz sniženo opterećenje).

Statistika pogonskih događaja može pratiti sljedeća izvanpogonska stanja promatranih jedinica u promatranoj mreži u promatranom jednogodišnjem razdoblju:

– poremećaje, koji obuhvaćaju barem jednu promatranu jedinicu u prisilnom zastoju
– prisilne zastoje, koji pojedinačno ili u skupovima tvore poremećaje
– planirane zastoje
– neraspoloživost, koja predstavlja skup svih prisilnih i svih planiranih zastoja.

Često statistike pojedinih država prate samo poremećaje ili samo prisilne zastoje, a ne i planirane zastoje ili planirane zastoje prate samo iznimno, ako je njihov nastup bio popraćem prekidom opskrbe električnom energijom. Ili prate samo zboj svih zastoja.

Poremećaji i prisilni zastoji

Poremećaj[164] je spontano zbivanje u promatranoj mreži u kojem je došlo do prisilnog isklopa barem jednog prekidača u mreži, čime je došlo do prisilnog zastoja barem jedne jedinice promatrane mreže. Neuspješni atomatski ponovni uklopi (APU)[165] vode prisilnim zastojima koji se ubrajaju u poremećaje. Uspješni APU-i ne pribrajaju se prisilnim zastojima i poremećajima, nego čine izdvojen skup *prolaznih zastoja*[166], jer je nakon kratkotrajnog – najčešće jednopolnog – prekida (u trajanju oko jedne sekunde) ponovno ostvareno normalno pogonsko stanje jedinice mreže.

Jedinica mreže na kojoj se dogodila prva greška u pojedinom poremećaju je *primarno pogođena jedinica*. Obuhvaća li poremećaj još jedinica u prisilnim zastojima, to su sekundarno pogođene jedinice. Očigledno je ukupan broj poremećaja u mreži manji ili najviše jednak ukupnom broju prisilnih zastoja u promatranom razdoblju.

Poremećaj započinje *greškom*[167]; to je događaj kojim neka jedinica prelazi iz ispravnog stanja u neispravno stanje. Razlikovati treba taj događaj od događaja prelaska u izvanpogonsko stanje (to je *otkaz*). *Povod greški*[168] može biti: iz okoline, tehnički povod, ljudski povod te povod u nepromatranoj mreži. Povod dakako može biti i nepoznat.

Svaka greška ne vodi poremećaju, ali uzrokuje *neispravnost*[169] pogođene jedinice mreže. Greška može biti takva da vodi: (a) prikrivenoj neispravnosti, koju uopće ne spoznajemo i koja ne rezultira otkazom, (b) takvoj neispravnosti koja omogućuje pogon i otklanjanje te neispravnosti bez isklopa promatrane jedinice, (c) neispravnosti za otklanjanje koje je isklop dugotrajnije odgodiv i (d) neispravnosti koja dovodi do otkaza promatrane jedinice.

Otkaz[170] je događaj kojim neka jedinica *prisilno* prelazi iz pogonskog stanja u izvanpogonsko stanje. Najčešći oblik otkaza je isklop djelovanjem zaštite. Otkaz se sinonimno naziva još i *ispad*, međutim ispad je nespretno izabran naziv za prisilni neodgodivi

[163] defect (engl.)
[164] disturbance (engl.), Störung (njem.)
[165] auto-reclosure (engl.), AWE = automatische Wiedereinschaltung (njem.)
[166] transient outage (engl.)
[167] failure (engl.), Fehler (njem.)
[168] cause of failure (engl.), Störungsanlass (njem.)
[169] fault (engl.), Fehlzustand (njem.)
[170] outage occurrence (engl.), Ausfall (njem.)

ručni isklop ili pogrešni, nesmotreni isklop, koji također predstavljaju oblike otkaza. Otkazi se razvrstavaju u jednostruke[171], ako je samo jedna jedinica prešla u neispravno stanje, i višestruke[172].

Kod greške se javlja *manifestaciju greške*[173], kako na primarno pogođenoj jedinici, tako i na sekundarno pogođenim jedinicama, ako ih poremećaj sadrži. To mogu biti: struja kratkog spoja, greška s ispadom/isklopom bez kratkog spoja, preopterećenje, izostanak napona, prekid primarnog kruga bez kratkog spoja i drugo (npr. preniska razina ulja u kakvoj opremi). Djelovanje zaštite zasniva se upravo na pojavi tih manifestacija.

Prisilni zastoj[174] je izvanpogonsko stanje promatrane jedinice ostvareno otkazom, dakle ispadom djelovanjem zaštite, ili prisilnim ili nesmotrenim isklopom, a ne planiranim ili pogonskim isklopom. Pogonski isklop je isklop ispravne jedinice radi potrebe pogona mreže, ni u kakvoj vezi sa stanjem te jedinice. Svaki prisilni zastoj uvijek se zbio u okviru određenog poremećaja.

Ako je promatrana jedinica u prisilnom zastoju zbog vlastite neispravnosti, govorimo o *unutarnjem razlogu zastoja*[175]. Ispravna jedinica također se može naći u prisilnom zastoju ali *vanjskim razlogom zastoja*[176].

Ako je uspješni uklop jedinice u prisilnom zastoju ostvaren nakon popravka ili zamjene neispravne komponente promatrane jedinice (tada za promatranu jedinicu kažemo da je bila u *kvaru*[177]), takav prisilni zastoj je *trajni zastoj*[178]. Svaki trajni zastoj mora sadržati barem jedan kvar. Ako je do uspješnog uklopa promatrane jedinice došlo bez popravka ili zamjene neke njezine komponente, neovisno o tome koliko je trajao takav prisilni zastoj, to je *privremeni zastoj*[179].

Planirani zastoji

Planirani zastoj[180] je izvapogonsko stanje promatrane jedinice ostvareno smišljeno, planiranim isklopom (a ne otkazom ili pogonskim isklopom), izvedenim radi provođenja neke planirane namjere. Povod planiranom zastoju upravo je namjera koja se želi ostvariti prilikom izvanpogonskog/beznaponskog stanja promatrane jedinice. To može biti: provođenje godišnjeg plana održavanja, otklanjanje nedostataka, postupak povodom nalaza preventivne dijagnostike, dojava o neispravnosti čije je otklanjanje odgodivo, potreba radi izgradnje, rekonstrukcije ili zamjene u promatranoj mreži, te zahtjev izvan promatrane mreže.

Planirani zastoj je s *unutarnjim razlogom*, ako je uslijedio radi zahvata na promatranoj jedinici, a s *vanjskim razlogom*, ako je uslijedio radi zahvata izvan promatrane jedinice, primjerice stoga jer se neka aktivnost u blizini promatrane jedinice može sigurno obaviti samo uz beznaponsko stanje promatrane jedinice.

---

171 single (engl.), einmalig (njem.)
172 multiple (engl.), Mehrfach-Ausfall (njem.)
173 Fehlerart (njem.)
174 forced outage (engl.)
175 reason/cause of outage-internal (engl.)
176 reason/cause of outage-external (engl.)
177 damage (engl.), Schaden (njem.)
178 permanent outage (engl.)
179 temporary outage (engl.)
180 planned outage (engl.)

Obilježja neraspoloživosti

Neraspoloživost[181] tvore svi prisilni i svi planirani zastoji promatranih jedinica u promatranom jednogodišnjem razdoblju. Neraspoloživost je sintetički iskaz o kvaliteti mreže i njezina održavanja. Što je mreža kvalitetnije oblikovana i izgrađena, to će prisilni zastoji biti rjeđi, područja pogođena poremećajima uža, a interventni popravci kratkotrajniji. Preventivno održavanje vodi smanjenju vjerojatnosti pojave greške i time poremećaja, odnosno prisilnih zastoja, a povoljna opremljenost za rad i dobra organizacija održavanja vodi smanjenju broja i trajanja planiranih zastoja.

Izvan trajanja neraspoloživosti, u promatranom jednogodišnjem razdoblju, promatrane jedinice bile su *raspoložive.*

Tijekom poremećaja ili planiranog zastoja može doći do prekida opskrbe električnom energijom. To se obilježje pridružuje primarno pogođenoj jedinici (ako se prekid zbio u poremećaju), odnosno jedinici koja je u planiranom zastoju (a zbio se prekid opskrbe).

Prekid opskrbe obilježen je *trajanjem prekida isporuke*, dakle početkom i završetkom neisporuke. *Neisporučena električna energija*[182] procjenjuje se prema očekivanom dnevnom dijagramu trajanja opterećenja ili na drugi utemeljeni način.

Iskazuje se trajanje vršnog opterećenja sustava tijekom kojeg bi se obustavilo toliko energije potrošačima kao što je doista procijenjeno kao neisporučeno, samo uz različite snage i trajanja. Dakle, računa se omjer ukupno neisporučene električne energije tijekom promatranog razdoblja i vršnog opterećenja promatranog sustava, iskazan u minutama[183].

Također, iskazuje se omjer ukupno neisporučene energije i ukupnog godišnjeg konzuma promatranog sustava na razini prijenosne mreže (zbroj isporuke direktnim potrošačima i distribucijskim područjima, bez gubitaka u prijenosnoj mreži). Time se iskazuje stupanj nepodmirene potražnje zbog neraspoloživosti jedinica prijenosne mreže. Često se taj pokazatelj uzima kao jedan-jedini, sintetski pokazatelj neraspoloživosti prijenosne mreže, odnosno njegov komplement do 100 posto kao sintetski pokazatelj njezine raspoloživosti.

Hrvatski primjer statistike pogonskih događaja

Kao primjer statističkih rezultata praćenja pogonskih događaja prikazuju se dijagrami trajanja planiranih zastoja, trajanja prisilnih zastoja te o trajanju neisporuke električne energije zbog poremećaja i planiranih zastoja, sumarno za sve jedinice prijenosne mreže u nadležnosti HEP-Operatora prijenosnog sustava, ostvareno u razdoblju 2000–2004. godine. Sintetski pokazatelj raspoloživosti te mreže, u gore prikazanom smislu, bio je 99,991 posto (2002), 99,979 posto (2003) i 99,992 posto (2004).

Inače, statistikom pogonskih događaja iskazuje se broj istovrsnih promatranih stanja na istovrsnim promatranim jedinicama mreže tijekom godine; to je apsolutna frekvencija tih stanja (1/god). Taj broj iskazan u odnosu na ukupnu količinu istovrsnih promatranih jedinica u mreži, bez obzira na to da li su one sve bile u tim stanjima ili ne, relativna je frekvencija tog stanja. Relativne frekvencije iskazuju se za sve jedinice u mreži vrijednostima 1/(kom·god), odnosno za vodove i 1/(100km·god). To je najčešće mjera za međunarodne usporedbe, ali pri

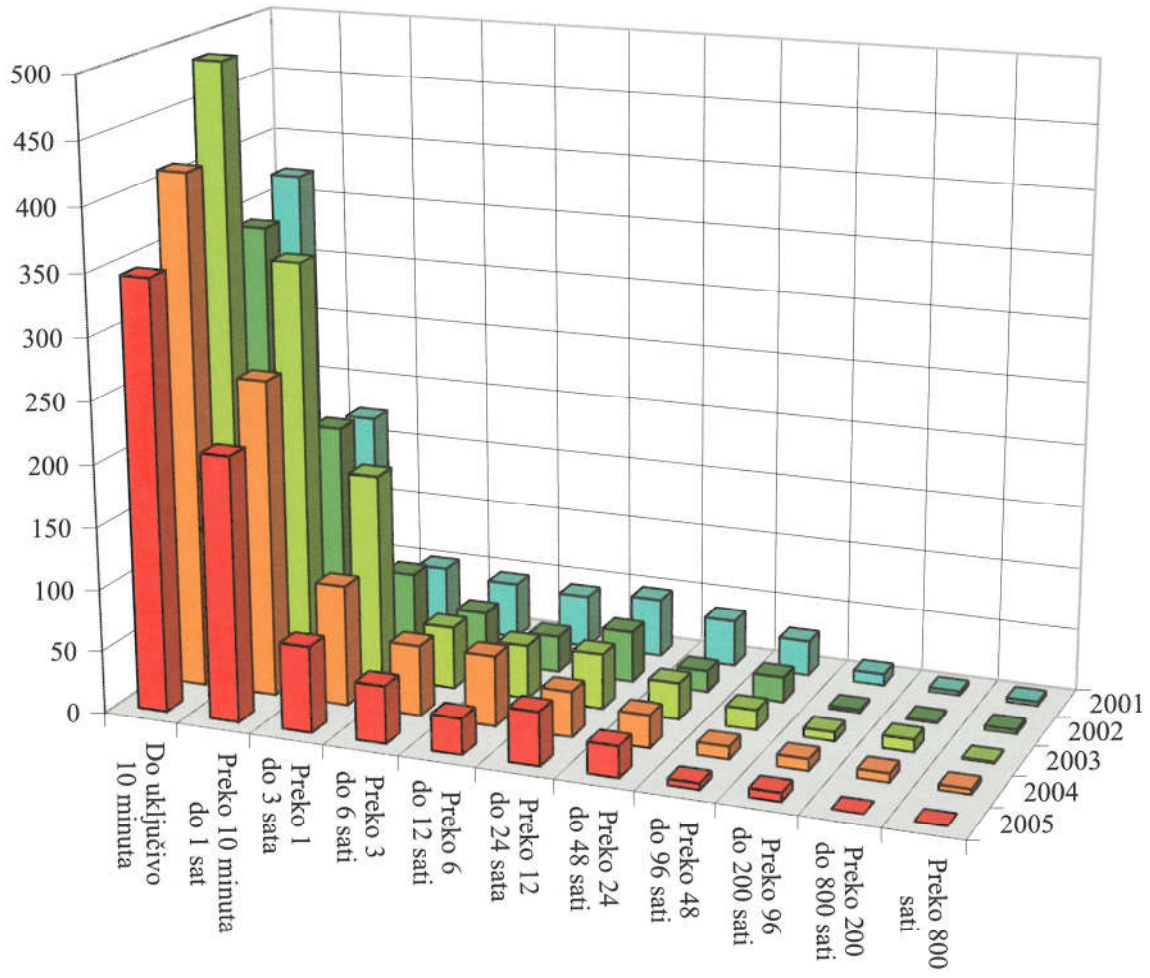
[181] unvailability (engl.), Nichtverfügbarkeit (njem.)
[182] EENS = Expected Energy Not Supplied (engl.)
[183] SM = System minutes (engl.)

tome valja točno znati što se podrazumijeva pod promatranom pojavom, što nije uvijek lako jednoznačno utvrditi. Kao primjer, daje se iskaz ostvarenih relativnih frekvencija prisilnih zastoja (unutarnjim i vanjskim razlogom) nadzemnih vodova i transformatora prijenosne mreže u nadležnosti HEP-Operatora prijenosnog sustava u 2004. godini, uz opasku da su slični podaci ostvareni u čitavu petgodišnjem nizu (2000–2004).

Ostvarene relativne frekvencije prisilnih zastoja unutarnjim i vanjskim razlogom u prijenosnoj mreži HEP-Operatora prijenosnog sustava u 2004. godini

Opis	Nadzemni vodovi			Transformatori			
Naz. napon	400 kV	220 kV	110 kV	400/220	400/110	220/110	110/SN
1/kom·god	2,67	4,68	2,24	2,25	0,67	1,21	1,22
1/100km·god	2,81	9,71	10,39	-	-	-	-

Kako čitati podatke iz te tablice? Primjerice, statistički gledano, dogodila su se 2,24 prisilna zastoja svakog dalekovoda 110 kV u 2004. godini. Da je to višegodišnji prosjek iz prošlosti, mogli bismo s time računati i u nekoj neposrednoj budućnosti. Ili, na drugi način iskazan: dogodila su se 10,39 takva zastoja po 100 km duljine dalekovoda 110 kV, dakle



Slika 22.3. Broj prisilnih zastoja prema trajanju (1/god)

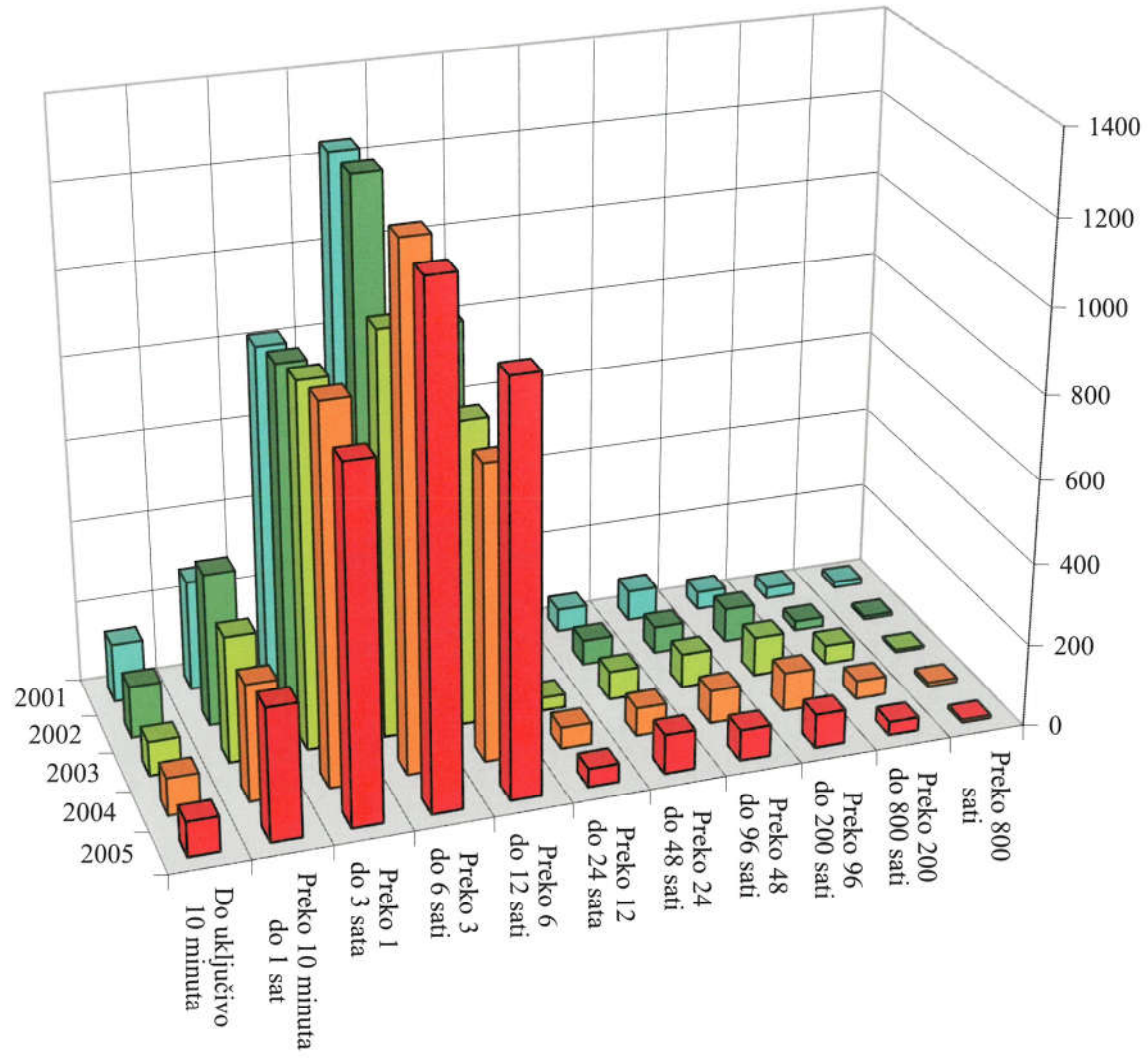
približno jedan takav zastoj na svakih 10 kilometara takvih vodova. U toj godini zbila su se 1,22 prisilna zastoja svakog prosječnog transformatora gornjeg napona 110 kV.

Pogledamo li koliko je bilo trajnih zastoja u istoj godini, dakle zastoja izazvanih kvarom barem jedne komponente tih jedinica, dolazimo do podskupa gornjih pojava.

Ostvarene relativne frekvencije trajnih zastoja (s kvarom barem jedne komponente) u prijenosnoj mreži HEP-Operatora prijenosnog sustava u 2004. godini

Opis	Nadzemni vodovi			Transformatori			
Naz. napon	400 kV	220 kV	110 kV	400/220	400/110	220/110	110/SN
1/kom·god	0,33	0,23	0,10	0,00	0,67	0,00	0,01
1/100km·god	0,35	0,47	0,46	-	-	-	-

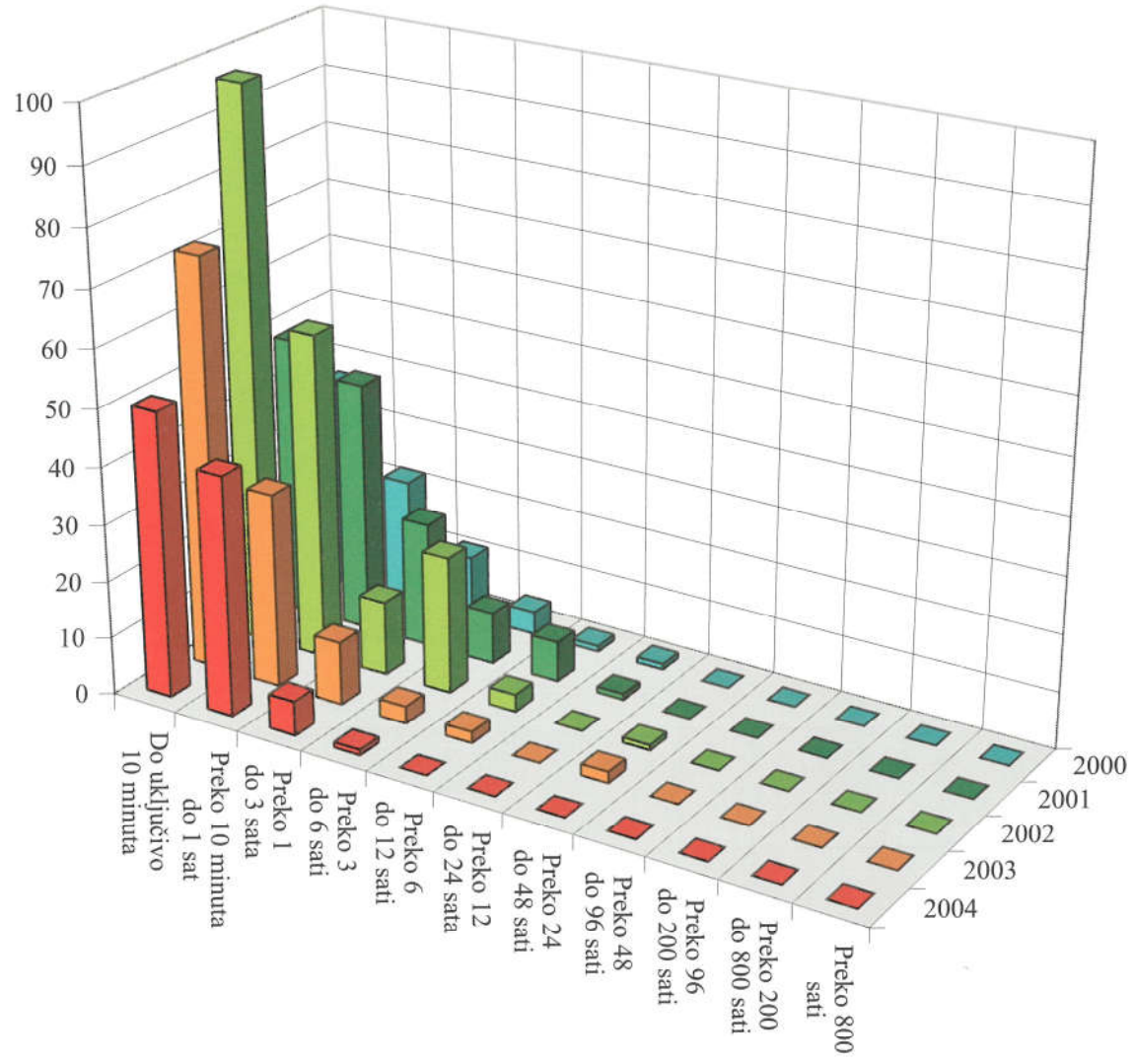
Proizlazi, da godišnje treba očekivati na svakih 0,1 vod nazivnog napona 110 kV, dakle na svakih 10 vodova u mreži 110 kV, jedan trajni zastoj, odnosno kvar koji će za-



Slika 22.4. Broj planiranih zastoja prema trajanju (1/god)

htijevati popravak ili zamjenu barem jedne oštećene/uništene komponente. Svi preostali prisilni zastoji bili su privremeni (2,24 – 0,10 = 2,14 bilo je takvih privremenih zastoja po prosječnom vodu); bez ikakva zahvata – ti su vodovi uspješno uključeni nakon njihova otkaza. Nije se dogodio niti jedan trajni zastoj transformatora 400/220 i 220/110 kV, dakle svi prisilni zastoji bili su privremeni, a tek na svakom 100-tom transformatoru 110 kV zbio se kvar.

Takve podatke ne smijemo uzimati iz predugog razdoblja u prošlosti (niti ih primjenjivati za predugo razdoblje u budućnost), jer se uvjeti za nastanke zastoja mijenjaju, doduše sporo ali ipak. Mijenja se osnovna struktura mreže, stanje izgrađenosti mreže, kakvoća opreme koja se ugrađuje u mrežu i njezina prosječna starost, te način vođenja pogona i održavanja (primjerice uvodi se sve više rad pod naponom ili je veći obuhvat održavanja uvjetovan stanjem a ne rokovima) (slike 22.3 do 22.5).



Slika 22.5. Broj poremećaja i planiranih zastoja prema trajanju prekida opskrbe (1/god)

23

Prijenos istosmjernom strujom visokog napona

Do pedesetih godina prošlog stoljeća, razvoj elektroenergetskih sustava, njihovo širenje i međusobno povezivanje temelji se na isključivoj primjeni sustava trofazne izmjenične struje, zahvaljujući brojnim prednostima. Doduše, u početku javne elektrifikacije, pa sve do razdoblja između dva rata, bilo je iskušavanja sustava za prijenos istosmjernom strujom. No, oni nisu mogli izbjeći značajnoj mani: istosmjerna struja ne može se transformirati na visoki napon, što bi omogućilo prijenos velikih snaga uz razumno veliku struju a – po tome – transformirati opet na napon pogodan za distribuciju i neposredno korištenje. Međutim i trofazni prijenos nije bez mana!

Motivi prijenosa istosmjernom strujom

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.

Tome se – u manjoj mjeri – dodaju skinefekt u vodiču i dielektrični gubici u izolaciji, kao posljedica izmjeničnog elektromagnetskog polja, kojih pojava nema pri istosmjernom naponu. Konačno, radi oblika vremenske promjene izmjeničnog napona, pojava korone na nadzemnim dalekovodima i debljina izolacije kabela ovise o tjemenoj veličini koja je za 41 posto veća od efektivne vrijednosti pogonskog napona. A efektivne, a ne tjemene vrijednosti, struje i napona određuju prijenosnu moć.

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 osim da se sva oprema zamijeni otpornijom na kratki spoj, što može biti teško izvedivo ili neprihvatljivo skupo.

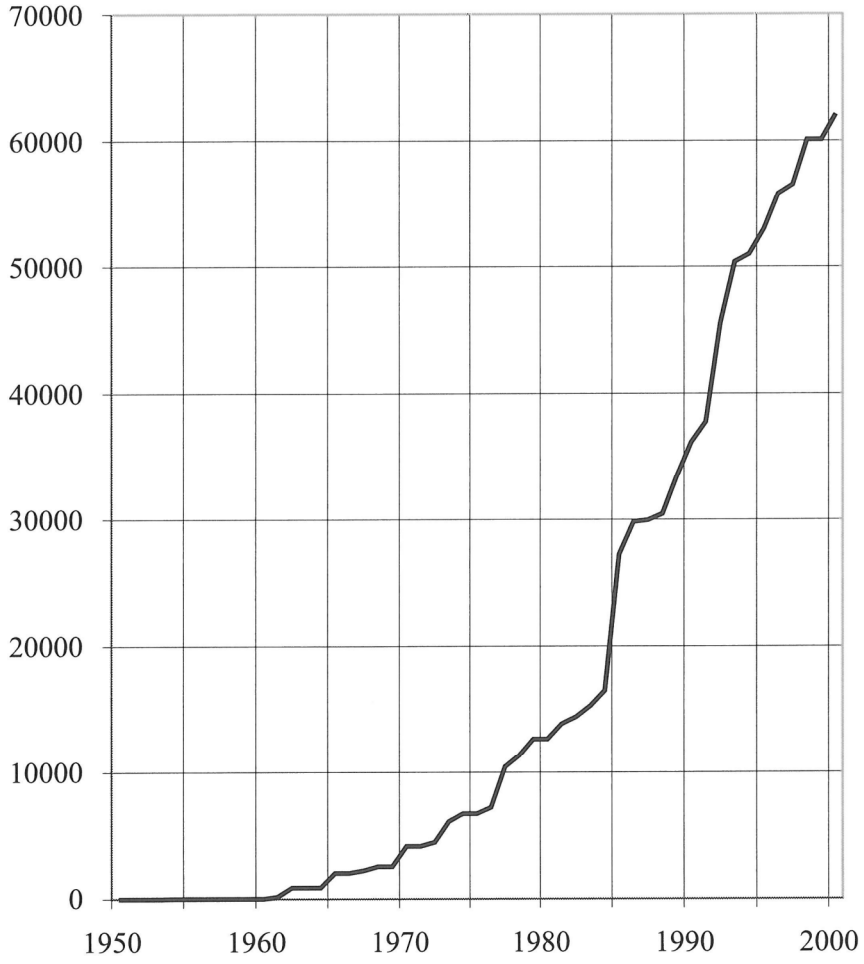
Povijesni hod primjene istosmjerne struje za prijenos

Svim tim manama odolijeva primjena istosmjerne struje za prijenos, umjesto izmjenične: *prijenos istosmjernom strujom visokog napona*[184]. 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 da 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.

Živini usmjerivači dugo su korišteni u ispravljačima za napajanje željezničkih i tramvajskih mreža (jer su regulacijske karakteristike istosmjernih motora povoljnije od izmjeničnih), i tu se steklo dragocjeno iskustvo.

Godine 1954. za podmorsko kabelsko povezivanje švedskog otoka Gotland s kopnom primijenjen je prijenos istosmjernom strujom visokog napona. Povezivanje s mrežama iz-



Slika 23.1. Instalirana snaga istosmjernih prijenosa u svijetu (MW)

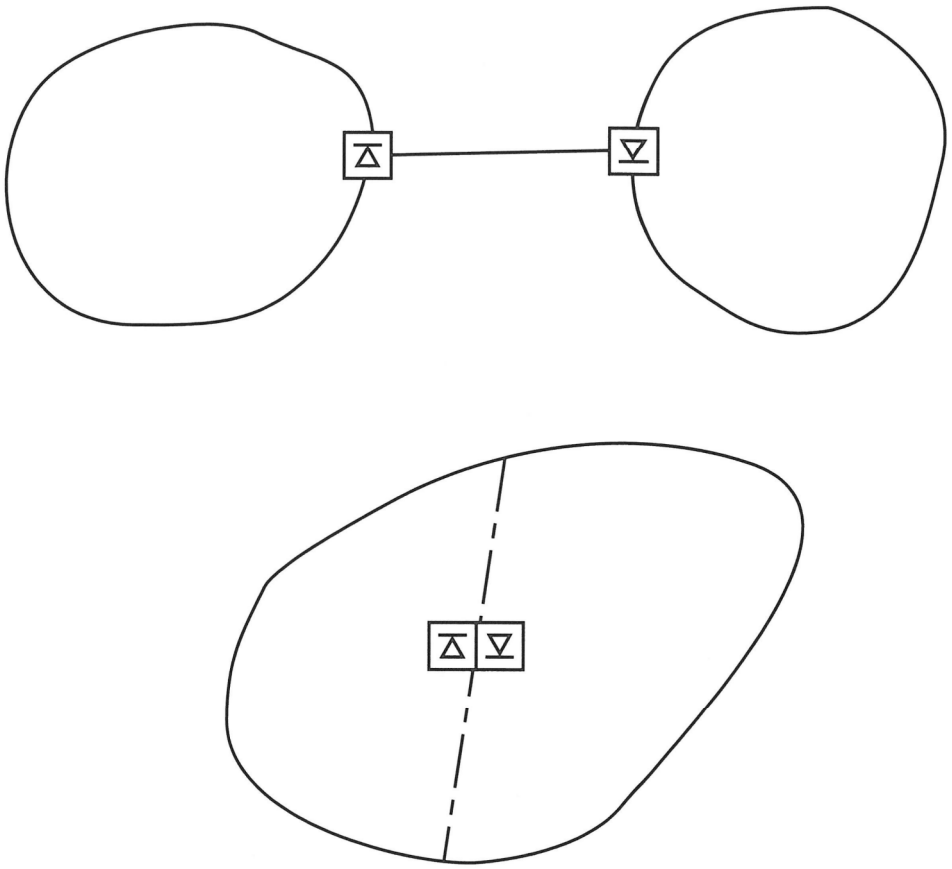
[184] HVDC = High Voltage Direct Current (engl.), HGÜ = Hochspannung-Gleichstrom-Übertragung (njem.)

mjenične struje provedeno je živinim usmjerivačem na predajnoj strani i živinim usmjerivačem na prijemnoj strani. Prenošena je snaga od 20 MW na daljinu 96 km uz napon 100 kV.

Prije toga, u tadašnjem Sovjetskom Savezu stjecala su se iskustva prijenosa nadzemnim vodom istosmjerne struje Kašira–Moskva uz prijenosnu snagu 30 MW, napon 100 kV i daljinu 112 kilometara. Taj prijenos u pogonu je od 1950. godine.

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 više od 75 gigavata (slika 23.1). Samo u Sjevernom i Baltičkom moru položeno je deset kabelskih prijenosa istosmjerne struje.

Istosmjerni prijenosi ostvaruju se na jedan od dva načina, koji se ukratko opisuju (slika 23.2).



Slika 23.2. Istosmjerni prijenos točka-točka i back-to-back prijenos

Prvi način: istosmjerni prijenos sadrži, pored dva usmjerivača, i dalekovod (nadzemni, podzemni i – osobito – podmorski) istosmjerne struje, prijenos *točka-točka*[185], a primjenjuje se:

– za prijenos vrlo velikih količina električne energije na vrlo velike udaljenosti (red veličine više stotina megavata na oko 700 kilometara ili više)

– za prijenos ispod morskih prepreka (duljine veće od 50-tak kilometara)

– za podzemno uvođenje u gradske zone (red veličine duljine sličan kao kod podmorskog kabela).

[185] point-to-point (engl.)

Pri kabelskom povezivanju, jeftinija konstrukcija kabela (od kabela izmjenične struje, za istu snagu prijenosa) donekle kompenzira ulaganja u usmjerivačke stranice. Pri nadzemnom povezivanju: dva umjesto tri vodiča, manje izolacije, jeftiniji stup, uža trasa, izostanak potrebe električne kompenzacije uzduž trase – opet dovodi do toga da, nakon neke udaljenosti, uštede na nadzemnom vodu posve kompenziranju ulaganja u usmjerivačke stanice. Kako troškovi dalekovodnih trasa u pravilu rastu brže od cijena opreme, to se i granična duljina ekonomične primjene istosmjernih prijenosa s vremenom smanjuje.

Drugi način: istosmjerni prijenos ne sadrži vod istosmjerne struje, nego samo dva usmjerivača jedan-do-drugoga, *leđima-u-leđa*[186] (slika 23.6), koji su *licima* povezani na čvorišta mreža izmjenične struje i služe:

– za povezivanje mreža raznih pogonskih frekvencija, npr. 50 i 60 Hz u Japanu

– za asinkrono povezivanje mreža raznih načina regulacije snaga-frekvencija u pogonu, svojedobno npr. interkonekcije UCPTE i OES SEV

– kada se želi spriječiti povećanje struje kratkog spoja u povezanim sustavima ili povećati stabilnost tog povezivanja.

Tiristorski usmjerivači omogućuju svojom regulacijom brzo ugađanje smjera i veličine snage koja se razmjenjuje vodom istosmjerne struje. Čak i pri kratkom spoju u jednom od povezanih sustava, struja istosmjernim vodom ne prekoračuje kontroliranu vrijednost.

Usmjerivačke stanice su vrlo skupocjena postrojenja. Osim zgrade s usmjerivačkim ventilima, te upravljanjem i regulacijom, sadržavaju i usmjerivačke transformatore te visokonaponsko rasklopno postrojenje s dalekovodnim poljima, ali i nekoliko polja za priključak kompenzatora jalove energije i filtera za popravak oblika izmjeničnog napona, koji se generira usmjerivačima. U svakoj usmjerivačkoj stanici treba osigurati jalovu snagu u vrijednosti, po prilici, jednakoj polovini vrijednosti djelatne snage usmjerivača. Usmjerivačko postrojenje od 600 MW za neposredno povezivanje dva sustava izmjenične struje bez voda istosmjerne struje (*back-to-back*), bilo bi oko dva do tri puta skuplje od transformatorske stanice 400/110 kV s dva transformatora od po 300 MVA.

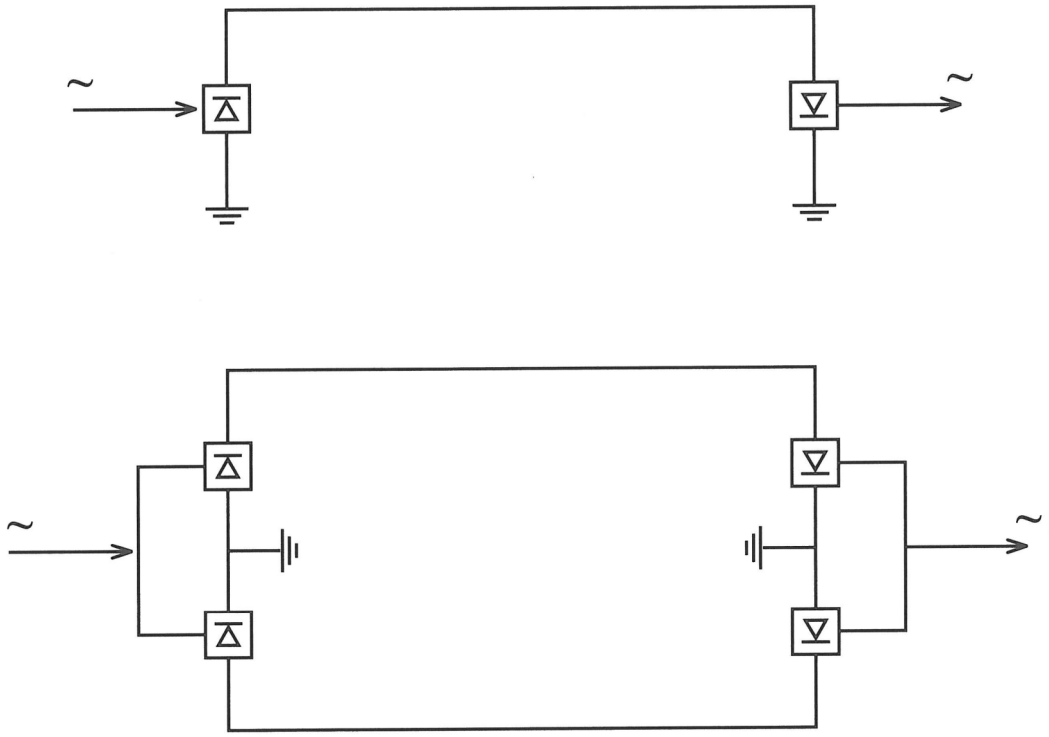
Privlačne su tendencije; cijena tiristorskih dioda naglo pada, a vrijednost njihovih tehničkih parametara rastu. Devedesetih godina prošlog stoljeća, nakon dvadesetak godina razvoja, jedinična cijena pala je na trećinu (u novčanim jedinicama po jedinici snage), napon jedne tiristorske diode se udvostručio – od dva narastao je na više od četiri kilovolta, a nazivna struja se učetverostručila – od jedan narasla je na četiri kiloampera.

Velike ukupne struje postižu se paralelnim, a visoki naponi serijskim spajanjem tiristorskih dioda – uz složenost radi istodobnosti regulacije i nužno potrebne velike podudarnosti svih parametara tih dioda. Veličina i smjer snage prenesene usmjerivačima, iz jedne mreže izmjenične struje u drugu, određeni su upravljanjem paljenja tiristorskih ventila. Energija za uređaje za okidanje uzima se iz primarnog kruga, a okidni impulsi upućuju se svjetlovodima, time su regulacijski uređaji odvojeni od visokog istosmjernog potencijala prema zemlji na kojem su tiristorski ventili. Tiristorske jedinice smještene su u ventilsku halu, hlađene su vodom a izolacija je zračna. Pojedini blokovi složeni su u spiralnu prizmu, tako da su najdonji na potencijalu zemlje a najgornji na punom potencijalu prema zemlji (slika 23.3).

Vrlo često se usmjerivačke stanice zasnivaju tako da u prvoj etapi imaju jednu snagu, te da je omogućeno, u drugoj etapi, njezino udvostručenje – izvođenjem još jednog sloga urcđaja koji predstavlja zrcalnu sliku prve etape. Visoke investicije se lakše podnesu i ranije

[186] back-to-back (engl.)

Slika 23.3. Tiristorski ventilski blokovi u japanskoj usmjerivačkoj stanici



Slika 23.4. Jednopolni i dvopolni prijenos točka-točka

počinje korištenje, a pogonska korist od takva rješenja, u konačnoj veličini izgradnje, je ta da postrojenje može funkcionirati polovinom prijenosne moći i u slučaju neraspoloživosti jedne polovine.

Vodovi istosmjerne struje su jednostavniji od trofaznih za prijenos iste snage. Nadzemni se izrađuju kao jednopolni (unipolarni) ili dvopolni (bipolarni) (slika 23.4 i 23.5). Kabelski se znaju izvesti s odlaznim vodičem kao jednožilnim kabelom, a za povratni vodič se koristi zemlja, s odgovarajućim uzemljivačima u početnoj i krajnjoj stanici. Primjenjuju se i rješenja s odvojenim jednožilnim kabelima za odlazni i za povratni vodič.

Pojednostavnjena usporedba izvedaba kaže da se s istim utroškom materijala za vodiče i izolatore, te podjednakim za stupove, nadzemnim vodom istosmjerne struje može prenijeti dvostruka snaga od one koja bi se mogla prenijeti vodom izmjenične struje.

Današnja ostvarenja

Ostvarene duljine kabelskih prijenosa istosmjernom strujom visokog napona su – u pravilu – ispod 100 kilometara. Najdulji kabelski prijenos u pogonu je duljine oko 250 kilometara (Švedska–Njemačka). Sedam svjetskih nadzemnih prijenosa su duljine više od 1000 kilometara. Najdulji je dug 1700 km (Inga–Shaba u Demokratskoj Republici Kongo).

Snage koje se prenose ovise o specifičnim okolnostima pojedinog slučaja. Najčešće je to između 300 i 600 MW. Šest svjetskih prijenosa imaju snagu jednaku ili veću od 2000 MW. Prijenos ispod La Manchea (Francuska–Engleska) ima prijenosnu moć upravo 2000 MW i najsnažniji je *kabelski* prijenos na svijetu. Najsnažniji *nadzemni* prijenos je na daljinu 800 kilometara, od HE Itaipu do Sao Paola – ima prijenosnu moć 6300 MW.

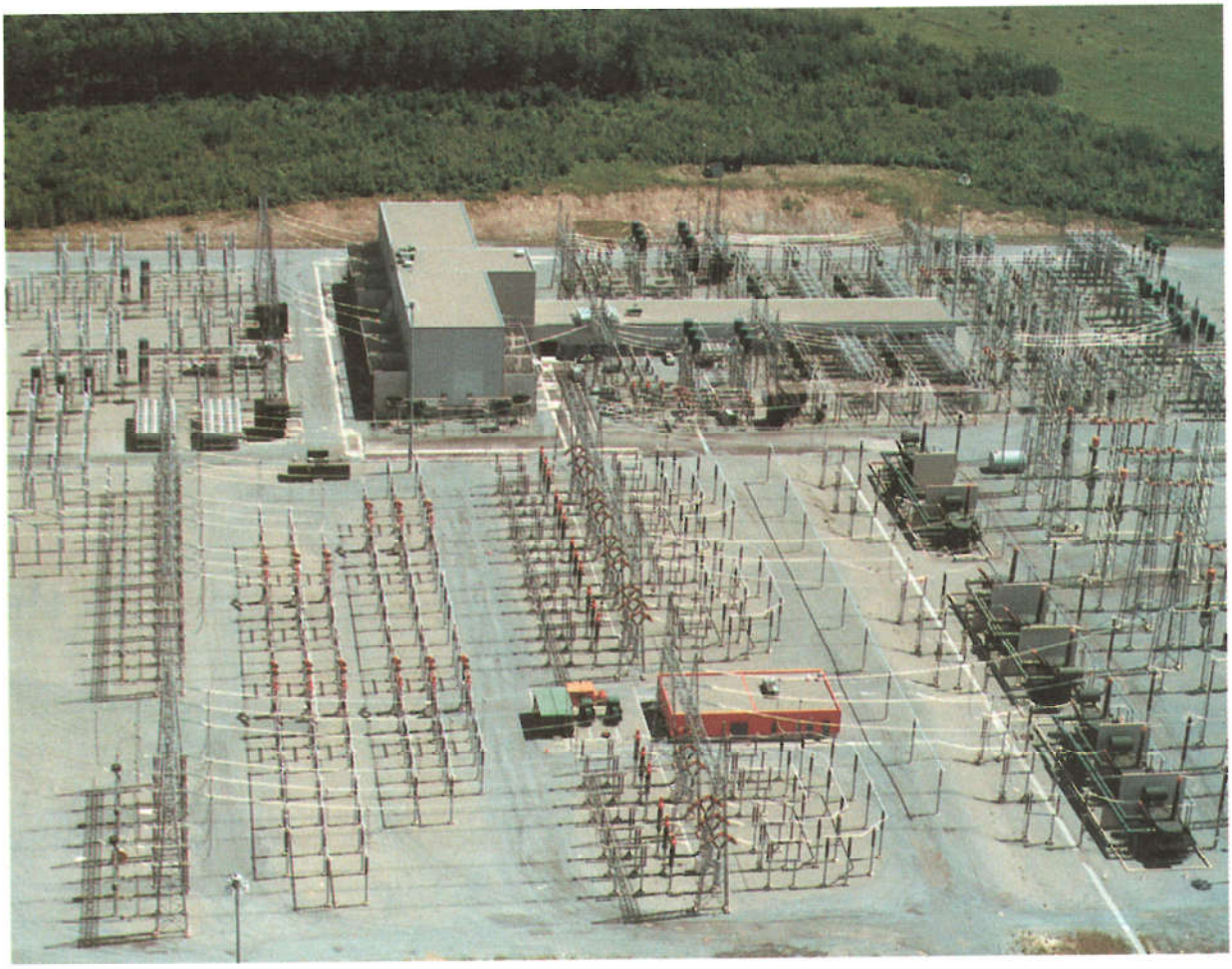
Slika 23.5. Dvopolni vod istosmjerne struje

Naponi koji se primjenjuju počinju od oko ±100 kV (jedan vodič +100 kV prema zemlji, drugi vodič –100 kV prema zemlji, dakle "linijski" napon 200 kV), da bi najveći broj prijenosa bio ostvaren uz napon ±250 kV. Najviši napon istosmjernog prijenosa u pogonu je ±600 kV.

Podsjetimo na kraju na jedan kuriozitet vezan uz nas. Tri godine nakon puštanja u pogon istosmjernog prijenosa Gotland, razmatran je projekt Jugelexport prema kojem bi se ostvario istosmjerni kabelski prijenos duljine oko 120 kilometara ispod Jadrana, radi trajnog izvoza električne energije na zapad. Godine 1957. još smo smatrali da smo prebogati hidroenergijom, te se takav izvozni aranžman činio zanimljivim! (U vrijeme pisanja ove knjige ponovno se aktualizira istosmjerni kabelski podmorski prijenos Hrvatska–Italija, ali za uvoz energije u Italiju s istoka, tranzitom preko hrvatske prijenosne mreže.)

U izgradnji je je najdulji podmorski kabelski prijenos na svijetu, NorNed-prijenos, između Norveške i Nizozemske, pod Sjevernim morem. Početak gradnje zbio se krajem 2004. a očekivano je u pogonu krajem 2007. godine. Prijenos ima duljinu 580 kilometara, a dvožilni kabel, napona ±450 kV, ima ukupnu prijenosnu moć 700 MW.

Konačno: najfantastičniji projekt podmorske veze istosmjernom strujom je veza Islanda s Europom duljine barem tisuću kilometara! Potencijal Islanda obnovljivim izvorima (geotermalna i hidroenergija) po stanovniku oko deset puta je veći od danas maksimalnih svjetskih prilika (Norveška), te je zamisliv izvoz. Prva faza zamišljena je jednožilnim 400 kilovoltnim kabelom presjeka 1200 mm^2, prijenosne moći 500 MW. Naredna faza bila bi udvostručenje. Najdublje more na trasi je skoro tisuću metara!



Slika 23.6. Back-to-back stanica Chateauguay, 2×500 MW, *povezuje mreže Hydro Quebec (Kanada) i NYPA (SAD)*

24

Dalekovod ili cjevovod?

Rijetke su zemlje na svijetu koje svoje ukupne potrebe za energijom mogu namiriti (po količini i oblicima) pridobivanjem prirodnih izvora energije na svom teritoriju. Karakteristično je upravo obrnuto. Primjerice: Japan samo oko 16 posto svojih (velikih) potreba namiruje iz vlastitih izvora, Njemačka nešto više od trećine (39 posto), Francuska samo polovinu, a Hrvatska 47,5 posto (2003).

Nafta, koja je presudna u sadašnjem stanju energetske opskrbe svijeta (oko 34 posto primarne potrošnje energije, 2003), naglašeno je neravnomjerno prirodno raspoređena. Oko 30 posto svjetskog pridobivanja nafte ostvaruje se danas (2003) na Bliskom istoku[187], a na tom području troši se samo nekoliko postotaka svjetske potrošnje. To su razlozi nezaobilazne potrebe za transportom golemih količina energije, međudržavnih i međukontinentalnih razmjera. Među zemljama koje se energetski pokrivaju su i one velikih prostranstava (Rusija, Kanada, te gotovo u potpunosti Kina), pa se i tu ostvaruju veliki energetski transporti.

Kako se za transport bilo kojeg oblika energije treba svakako utrošiti energija (pored drugih neenergetskih troškova), srazmjerno duljini transportnog puta, dodavanje transporta u putanju između mjesta pridobivanja i mjesta korištenja tim oblikom energije zapravo znači umanjenje energetske efikasnosti njegova korištenja. Neprihvatljivo je zamišljati okolnosti prema kojima bismo neki oblik energije transportirali toliko da za taj transport utrošimo energije više od ukupnog energetskog sadržaja transportirane mase.

Svi se primarni oblici energije (vodne snage, ugljen, nafta, prirodni plin, nuklearno gorivo, nekonvencionalni oblici) mogu – neki čak moraju – pretvoriti u električni oblik radi finalnog korištenja.

Također, svi se korisni oblici energije (svjetlo, mehanički rad, toplina i kemijski oblik) daju ostvariti i pretvorbom iz električnog oblika. Svjetlo (i čitav niz suvremenog korištenja energijom: telekomunikacije, obrada podataka...), te mehanički rad (osim za pokretanje velikog dijela prometnih sredstava) danas se praktički ostvaruju isključivo takvom konačnom pretvorbom. Distribucija u električnom obliku je najudobnija. Zbog svega toga, udio električnog oblika u ukupnoj energiji predanoj na korištenje stalno raste. Danas (2003) je to za cijeli svijet više od 16 posto, prema 9,5 posto prije trideset godina (1973).

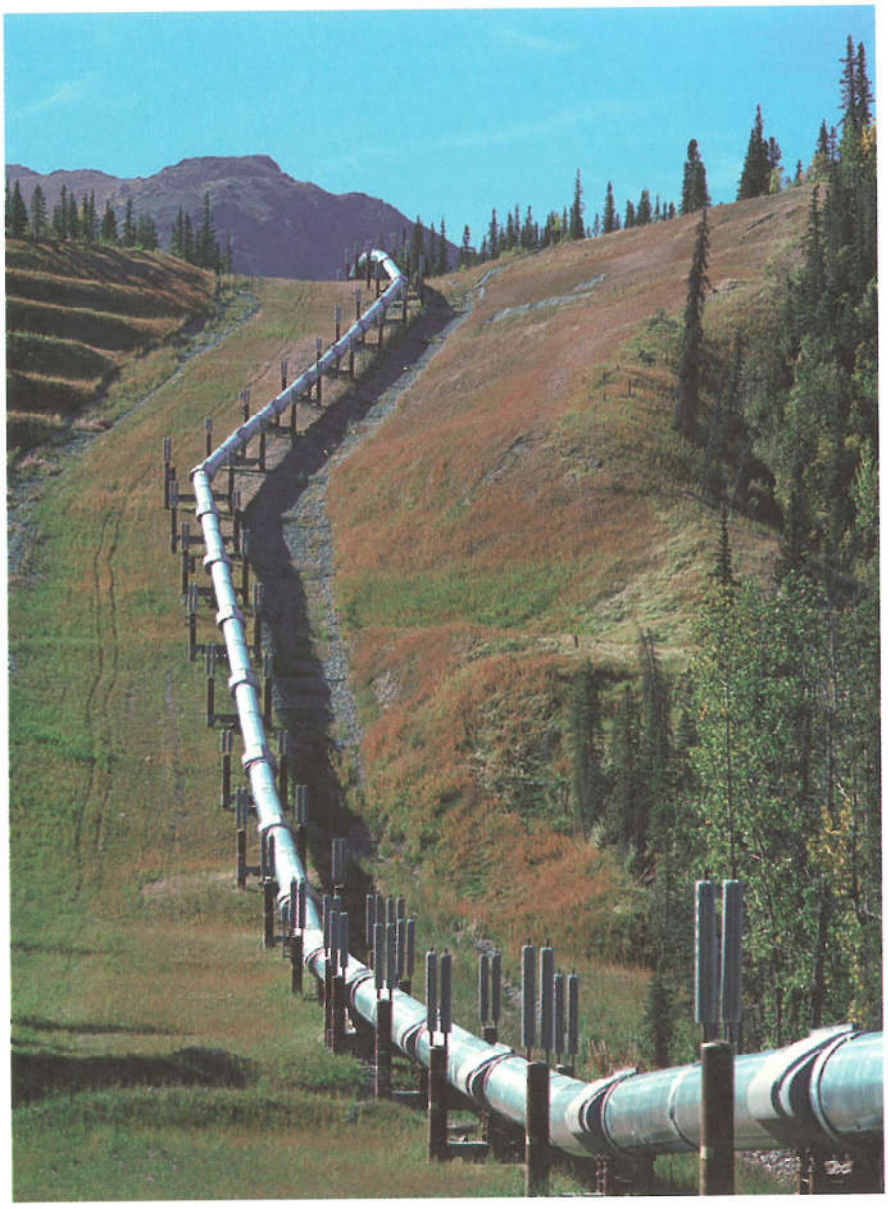
Može se stoga upitati: treba li primarne oblike energije najprije pretvoriti u električni oblik i tako prenositi, dakako i distribuirati? Odgovor je naglašeno negativan! Pretvorba energije svih goriva u električni oblik odvija se uz nepovoljan stupanj djelovanja: u konvencionalnim i nuklearnim termoelektranama oko jedna trećina, a u tek odnedavna primjenjivanim kombi-elektranama oko jedna polovina. Preko 50 posto finalne energije koristi se u toplinskom obliku (za procese i zagrijavanje prostora), te je za te svrhe razumno dobaviti neko gorivo, a samo iznimno elektriku. Oko četvrtina finalne energije koristi se danas u prometu – cestovna vozila, brodovi i zrakoplovi danas funkcioniraju na pogon derivatima nafte, svakako im ne odgovara opskrba električnom energijom.

Ako je transportna putanja ocean, onda iz tehničkih i ekonomskih razloga dolazi u obzir jedino brodski transport (ugljena, nafte, ukapljenog prirodnog plina, nuklearnog goriva).

[187] Bliski istok obuhvaća zemlje: Bahrain, Iran, Irak, Izrael, Jordan, Kuvajt, Libanon, Oman, Katar, Saudijsku Arabiju, Siriju, Ujedinjene Arapske Emirate i Jemen.

Stoga, konačno: da li je za svladavanje kontinentalnog transporta onog dijela energije koji će se finalno svakako prihvatiti u električnom obliku, povoljnija prethodna pretvorba u električni oblik i – potom – prijenos, ili je prihvatljiviji transport u izvornom obliku, a pretvorba u električni oblik u glavnim čvorištima potrošnje?

Za dva primarna oblika odgovor je nedvojben: vodne snage moraju se transformirati u električni oblik na prirodnom svom izvoru. Obrnuto – nuklearno gorivo treba transportirati do mjesta koje je povoljno ekološki, geološki te u pogledu opskrbljenosti rashladnom vodom, ali dovoljno blizu glavnih čvorišta potražnje električne energije tako da – načelno – neće biti prijenosa električne energije na veliku daljinu. Za podjednaku godišnju proizvodnju električne energije, NE Krško treba 17 tona nuklearnog goriva, a odgovarajuća konvencionalna termoelektrana oko 5 milijuna tona ugljena, srednje ogrjevne moći!



Slika 24.1. Naftovod na Aljasci

Nuklearno gorivo, očigledno, treba transportirati u izvornom obliku što bliže mjestu korištenja, voda se uopće ne može transportirati, a transport ugljena na veće udaljenosti kopnom (dakle željeznicom) treba izbjegavati. Što je s naftom i prirodnim plinom?

Ako je cijena transporta jedinice energije na daljinu od 500 kilometara trofaznim prijenosom 100 posto, onda je cijena transporta isto tolike energije na jednaku udaljenost naftovodom oko 25 posto, a plinovodom oko 50 posto. To su približne vrijednosti, ovise mnogo od izvora podataka. Ako bi se nafta konvertirala u elektriku konvencionalnom termoelektranom na kraju naftovoda, trebalo bi prenijeti oko 3 jedinice energije (za dobivenu jednu jedinicu električne energije). Dakle cijena prijenosa naftovodom iznosila bi oko 75 posto cijene elektroprijenosa, uz navedene odnose.

Da bi se plin konvertirao u elektriku na kraju plinovoda najsuvremenijom kombi-elektranom (prirodni plin najprije izgara u plinskoj turbini, a izlazni vrući plin iz te turbine otparuje vodu u izmjenjivaču tako da dobivena para pokreće još jednu parnu turbinu), onda plinovodom treba prenijeti oko dvije jedinice energije za jednu jedinicu električne energije. Cijena prijenosa plinovodom bila bi jednaka cijeni elektroprijenosa, opet uz navedene polazne odnose.

Kada se tome dodaju količine nafte koje ionako treba transportirati u izvornom obliku za finalne potrebe prometa, ili plina kojeg je korisno dovesti u izvornom obliku za finalne toplinske potrebe, te količine za neenergetsko korištenje tim dvama oblicima, onda je na takvim trasama trofazni električni prijenos manje prihvatljiv. Dakako, vrijedi i obrnuto: ako baš između ta dva čvorišta postoji presudna potreba cjeline elektroenergetskog sustava, ili čak kontinentalne interkonekcije, da se gradi električna veza – to će onda naravno presuditi u korist dalekovoda.

Okolnosti postaju zanimljivije za prijenose na još znatno veće udaljenosti (unutar najvećih svjetskih država ili kontinentalnih razmjera). Primjerice za daljinu od 1000 kilometara je trofazni prijenos izmjeničnom strujom skuplji nego prijenos istosmjernom strujom. Treba graditi istosmjerni prijenos, ako je ekonomsko gledište presudno, a tehnički nužno električno rješenje (npr. prijenos proizvodnje velike hidroelektrane).

Kapacitet prijenosa naftovoda je oko 30, a plinovoda oko 10 puta veći od termičke prijenosne moći jednostrukog trofaznog dalekovoda 400 kV (cijevi naftovoda i plinovoda u tom primjeru su promjera oko jednog metra, a kapacitet je iskazan ogrjevnom moći goriva koje se prenosi)[188]. U pogledu estetskog i fizičko-prostornog uklapanja u okolinu, cjevovodi su povoljniji od dalekovoda (ako su ukopani u tlo). Proizlazi da su za velike transportne

[188] Kapacitet najvećeg svjetskog naftovodnog sustava "Družba" dakako je veći: čak 60 puta veći je od termičke prijenosne moći jednostrukog trofaznog dalekovoda 400 kV (1350 MVA). Taj sustav proteže se od središnje Rusije do središnje Europe u ukupnoj duljinu 4000 kilometara. Nazivni godišnji kapacitet mu je 80 milijuna tona, a sadašnji mu je kapacitet 180 tisuća tona sirove nafte na dan. Jadranski naftovod, od hrvatsko-mađarske granice do Omišlja, predstavlja jedan od krakova priključenih na taj naftvodni sustav.
Sjevernoeuropski plinovod u izgradnji, na potezu Rusija-Njemačka, prolazit će Baltičkim morem i biti dug 1200 kilometara. Gradnja je otpočela krajem 2005. godine a u prvoj etapi, koja se planira dovršiti do 2010. godine, imat će kapacitet od 27 milijarda kubičnih metara prirodnog plina godišnje, odnosno 74 milijuna kubičnih metara plina dnevno. Njegov je kapacitet, dakle, nešto preko 20 puta veći od termičke prijenosne moći jednostrukog trofaznog dalekovoda 400 kV.
Dakako, u oba prikazana primjera, kapaciteti tih cjevovoda računati su prema ogrjevnoj moći goriva koje se godišnje prenosi a ne prema eventualno dobivenoj električnoj energiji iz tog goriva na kraju cjevovoda; ta bi bila dvostruko-trostruko manja. S druge strane, termička prijenosna moć dalekovoda ne bi uopće mogla biti iskorištena na velikim duljinama prijenosa, jer bi tu moć uvjetovala granica stabilnosti prijenosa, to manja što je udaljenost prijenosa veća. Na taj način treba gledati na iznesene usporedbe s dalekovodom.

udaljenosti velikih količina energije povoljniji podzemni cjevovodi od dalekovoda. Osobito za transport nafte koji je ionako velikim dijelom danas neizbježan radi potreba cestovnog, vodnog i zračnog prometa.

Ekonomičan je i vodni transport rijekama, kanalima i jezerima. Međutim, on je ograničen njihovim prirodnim zemljopisnim protezanjem. Pogotovo je ekonomičan prekooceanski brodski transport svih fosilnih goriva (ugljena, nafte, *ukapljenog prirodnog plina*[189]). Ostvaruje se veliki transkontinentalni brodski transport ugljena, kojem je kontinentalna udaljenost transporta ograničena – ovisna o ogrjevnoj vrijednosti ugljena.

Povoljnost naftovoda za prijenos energije ne znači istodobno forsiranje nafte pred drugim oblicima energije. Težnje su upravo obrnute: od početka 70-tih godina prošlog stoljeća, postupno ali uporno, opada udio nafte u svjetskoj energetskoj opskrbi. Suprotne težnje prema prirodnom plinu dovele su do izgradnje bogate mreže nacionalnih i kontinentalnih plinovoda, jer se prirodni plin koristi praktički bez transformacije, vrlo je pogodan za distribuciju i ekološki podnošljiv pri finalnom korištenju u toplinskom obliku.

Slika 24.2. Plinovod u Švicarskoj

[189] LNG = liquid natural gas (engl.)

25

Nekonvencionalni izvori energije i prijenos električne energije

Primarne izvore energije, dakle one koji se nalaze u prirodi, možemo u pogledu uobičajenosti njihova korištenja razvrstati u konvencionalne i nekonvencionalne. Konvencionalni ili uobičajeni izvori energije su: ugljen, sirova nafta, prirodni plin, nuklearno fisijsko gorivo, ogrjevno drvo i vodne snage korištene u velikim hidroelektranama.

Danas tehnološki raspoloživi i ekonomski dostižni *nekonvencionalni izvori energije*[190] su: geotermalna energija, biomasa i otpaci, energija vjetra i Sunčeva zračenja, te vodne snage korištene u malim hidroelektranama, uobičajeno snage do uključivo 10 MW. Ogrjevno drvo korišteno na nekonvencionalni način uvrštavamo također u nekonvencionalne izvore, kao biomasu. Nekonvencionalne izvore nazivamo još i *novi* izvori energije, ekološki izvori ili eko-izvori. Svojedobni nazivi alternativni izvori i aditivni izvori, s vremenom su napušteni.

Primarne izvore energije možemo razvrstati i u pogledu njihove obnovljivosti na neobnovljive i obnovljive. Danas raspoloživi neobnovljivi ili iscrpljivi izvori su: ugljen, sirova nafta, prirodni plin te nuklearno fisijsko gorivo.

Obnovljivi[191] ili neiscrpljivi izvori su: geotermalna energija, ogrjevno drvo, biomasa i otpaci, energija vjetra i Sunčeva zračenja, te vodne snage korištene u velikim i malim hidroelektranama.

Vidimo da se skup nekonvencionalnih izvora razlikuje od skupa obnovljivih izvora samo po tome što u nekonvencionalne izvore ne uvrštavamo vodne snage korištene u velikim hidroelektranama i što ogrjevno drvo pridružujemo ostaloj biomasi, uvrštavajući ga dakako u obnovljive izvore. U našem ćemo daljnjem izlaganju voditi strogo računa o tome da li se ono odnosi na nekonvencionalne izvore ili na obnovljive izvore energije.

Ovdje nismo uopće dotaknuli primjenu gorivnih ćelija ni vodikovu tehnologiju! Dakako, nismo jer tu uopće nije riječ o primarnim 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 utrošak više energije pri toj pretvorbi nego što će se dobiti iskorištavanjem vodika.

Uvodno, kažimo još i to da je razmatranje nekonvencionalnih/obnovljivih izvora vrlo slojevito i treba ga uzimati u obzir vrlo oprezno i s velikim razumijevanjem, jer *što vrijedi ovdje i danas ne mora vrijediti tamo i sutra.*

---

[190] non-conventional energy sources (engl.), nichtkonventionelle Energiequellen (njem.)

[191] renewable energy sources (engl.), erneuerbare Energiequellen (njem.). *Obnovljivost* pojedinog izvora energije najlakše pojmimo ako kažemo da je obnovljiv izvor onaj kojeg se prosječni dotok svake godine ponavlja, bez smanjenja – barem za ljudsko poimanje vremena. U tom pogledu, svi promatrani nekonvencionalni izvori su obnovljivi. Geotermalnoj energiji izvor su energetski procesi u Zemljinoj nutrini koji će prema ljudskom poimanju vremena trajati *do sudnjeg dana,* dakle praktički do u nedostižnu budućnost. U pogledu ogrjevnog drveta, istaknimo da je uvjet obnovljivosti neprekidno pošumljavanje prostora barem toliko da godišnji prinos bude jednak godišnjem iskorištenju drvne mase.

Svojstva nekonvencionalnih izvora

Svojstva nekonvencionalnih izvora energije ne možemo promatrati izdvojeno od općenito znanih svojstava konvencionalnih izvora, tek uspoređivanjem s tim svojstvima možemo utemeljeno donositi kvalifikative nekonvencionalnih izvora. Neka svojstva nekonvencionalnih izvora su poželjna a neka nepoželjna. Na ovome mjestu opširnije ćemo prikazati samo ona svojstva nekonvencionalnih izvora energije, koja imaju ili mogu imati osobiti, značajni, nezaobilazni utjecaj (i) na prijenos električne energije. Razmatramo, dakle, svakako samo nekonvencionalne izvore koji se, ili kada se, pretvaraju u električni oblik energije.

U tablici 3 iznose se neka važnija opća i pojedinačna svojstva, ali pretežito poželjna svojstva.

Ispunjeno poželjno svojstvo	
Djelomično ispunjeno poželjno svojstvo	
Neispunjeno poželjno svojstvo	

Tablica 3. Pretežno ispunjena poželjna svojstva nekonvencionalnih izvora

Svojstvo izvora	Poželjno	MHE	Su-T	Su-E	Vj.	Bio.	Geo.
Obnovljivost	Ispunjena						
Potencijal	Što veći						
Energija za postrojenja	Što manja						
Energija za pridobivanje	Što manja						
Emisija kod pretvorbe	Što manja						
Moguća diversifikacija	Ispunjeno						
CO_2-neutralnost	Povoljna						

MHE = korištenje vodnih snaga u malim hidroelektranama
Su-T = korištenje Sunčeva zračenja toplinskim kolektorima
Su-E = korištenje Sunčeva zračenja fotoelektričnim ćelijama
Vj. = korištenje energije vjetra vjetroelektranama
Bio. = korištenje biomase i otpada
Geo. = korištenje geotermalne energije

Neka važnija opća svojstva, ali u kojima pretežu poželjna svojstva nekonvencionalnih izvora energije su: obnovljivost tih izvora (sveprisutna), potencijal (najčešće velik, primjerice sa

Sunca godišnje dostruji na tlo Hrvatske približno 500 puta toliko energije kolika je sadašnja primarna godišnja potrošnja svih oblika energije), potrebna energija za izgradnju postrojenja za pretvorbu obnovljivog izvora energije u električni oblik (uglavnom ne pretjerana, osim kod fotoelektričnog korištenja Sunčevim zračenjem[192]), energija za pridobivanje izvornog oblika energije (nema je za sve nekonvencionalne oblike energije, treba samo postrojenje za pretvorbu *izložiti* djelovanju tog izvora, osim kod korištenja biomasom), štetna emisija tvari ili buke kod pretvorbe u električni oblik (praktički je prihvatljivo malena ili je uopće nema), moguća posvemašnje diversificirana primjena[193] (ispunjeno kod svih: svi izvori nekonvencionalne energije – dakako ako se raspoloživi na promatranom mjestu – mogu se koristiti *u malome*, u vlastitoj režiji, djelomice ili potpuno u samogradnji – time se trošak rada kod instaliranja, pogona i održavanja praktički dade izbjeći ili barem prikriti) i kumulativna CO_2-neutralnost (ispunjena kod svih izvora, osim kod fotoelektričnog korištenja Sunčevim zračenjem[194] – tamo je neizravna emisija velika, pri proizvodnji velikih količina materijala za ugradnju u postrojenje).

U tablici 4 daje se pregled pretežno neispunjenih poželjnih svojstava nekonvencionalnih izvora energije. Značenje pojedinih kratica nad kolonama i zatamnjenja u poljima te tablice isto je kao za tablicu 3.

Tablica 4. Pretežno neispunjena poželjna svojstva nekonvencionalnih izvora

Svojstvo izvora	Poželjno	MHE	Su-T	Su-E	Vj.	Bio.	Geo.
Površinska distribucija	Ravnomj.						
Površinska gustoća	Povoljna						
Izvorno uskladištenje	Moguće						
Prirodna oscilacija	Mala						
Nužnost rezerve	Ne treba						
Zauzimanje prostora	Povoljno						
Stupanj djelovanja	Povoljan						
Mogućnost kogeneracije	Moguća						

[192] Vrijeme energetske amortizacije, trajanje pogona u kojem će kumulativna proizvodnja energije biti jednaka energiji uloženoj u proizvodnju opreme i materijala, za sunčane elektrane je tri do sedam godina!

[193] Govorimo o *distribuiranoj proizvodnji*, o (najčešće) malim elektranama priključenim na distribucijsku mrežu.

[194] 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 iskorištavanju te biomase biti jednaka imisiji CO_2 prigodom fotosinteze te biomase.

Zaključno možemo reći da iznesena pretežno ispunjena poželjna svojstva nemaju bitan utjecaj na prijenos električne energije proizvedene nekonvencionalnim izvorima.

Pogledamo li pretežno neispunjena a opet poželjna svojstva nekonvencionalnih izvora energije, dolazimo do drukčijeg zaključka.

Poželjna bi bila što ravnomjernija (a nije) površinska distribucija[195] tih izvora energije (osim kod Sunčeva zračenja, ono je *najpravednije* raspoređeno po čitavu globusu). Površinska gustoća je mala, praktički za sve nekonvencionalne izvore[196], te je veliko zauzimanje prostora uređajima za pretvorbu u električni oblik. Stupanj djelovanja je niži od nekonvencionalnih rješenja, prvenstveno jer je riječ o naglašeno malim snagama – za današnje poimanje, a kod fotoelektričnog korištenja osobito; današnje fotoćelije ostvaruju 5–15 posto, što ponovno znači veliko zauzimanje prostora[197].

Svojstva, najutjecajnija na prijenosnu mrežu

Dolazimo do najvažnijih svojstava koja imaju neposredni utjecaj (i) na prijenosnu mrežu na koju su, najčešće ne izravno nego posredovanjem srednjonaponske mreže, povezana postrojenja za proizvodnju električne energije iz nekonvencionalnih izvora energije. To je, prvo, *nemogućnost izvornoga uskladištenja* i transporta u izvornom obliku svih nekonvencionalnih izvora – moraju se pretvoriti u električni oblik na mjestu, u trenutku i ritmu njihova nastupa i plasirati u elektroenergetski sustav. Tu jedino korištenje biomasom stoji po strani, moguće ju je transportirati na razumnu udaljenost (jer bi pretjerana udaljenost tražila više energije za transport od energetskog sadržaja tvari koja se prevozi, te bi to bilo nerazumno) te uskladištiti i koristiti u ritmu potreba, a pri kogenerativnom korištenju u ritmu potražnje toplinske energije. I drugo, naglašeno loše svojstvo: *prirodna oscilacija* dotoka nekonvencionalnih izvora – nije prisutna jedino kod korištenja geotermalnom energijom, a kod korištenja biomasom prisutna je ali dade se kompenzirati uskladištenjem biomase.

Oscilacija prirodnog dotoka vjetra je od nula do *više od sto posto*, jer pri olujnom vjetru mora se obustaviti rad vjetrogeneratora, kao i pri vrlo malim brzinama vjetra (slika 25.1). Kako je snaga vjetrene turbine proporcionalna brzini vjetra na treću potenciju, to i mala promjena brzine predstavlja znatniju promjenu snage. Udvostručenje brzine vjetra vodi osmerostrukom povećanju snage! Sunčevo zračenje jednako tako predstavlja izvor s oscilacijom 0–100 posto, jer ga noću uopće nema (slika 25.2). Male HE također mogu biti na takvim vodotocima, koji u određenim prilikama znaju posve presušiti.

Trajanje iskorištenja instalirane snage, dakle omjer godišnje proizvedene energije i instalirane snage, malo je kod svih izvora kojih su prirodne oscilacije velike, jer su samo mali dio godišnjeg vremena *u punom pogonu*[198]. Za sve oblike energije kojih je trajanje godišnjeg

[195] Površinska distribucija je raspodjela po Zemljinoj površini, a površinska gustoća je gustoća dotoka pojedinog izvora energije po jedinici ploštine Zemlje.

[196] Na jedan četvorni metar na našoj geografskoj širini dostruji godišnje približno 1000 kilovatsati Sunčeva zračenja, a ako uzgojimo pšenicu na tom četvornom metru, slama će imati energetski sadržaj od samo 2 kilovatsata. Gdje je to usporedbi s naftnom bušotinom s godišnjim iscrpkom od recimo 100 tisuća tona kojeg je energetski sadržaj otprilike 1 milijarda kilovatsati a zauzima ploštinu od par stotina četvornih metara!

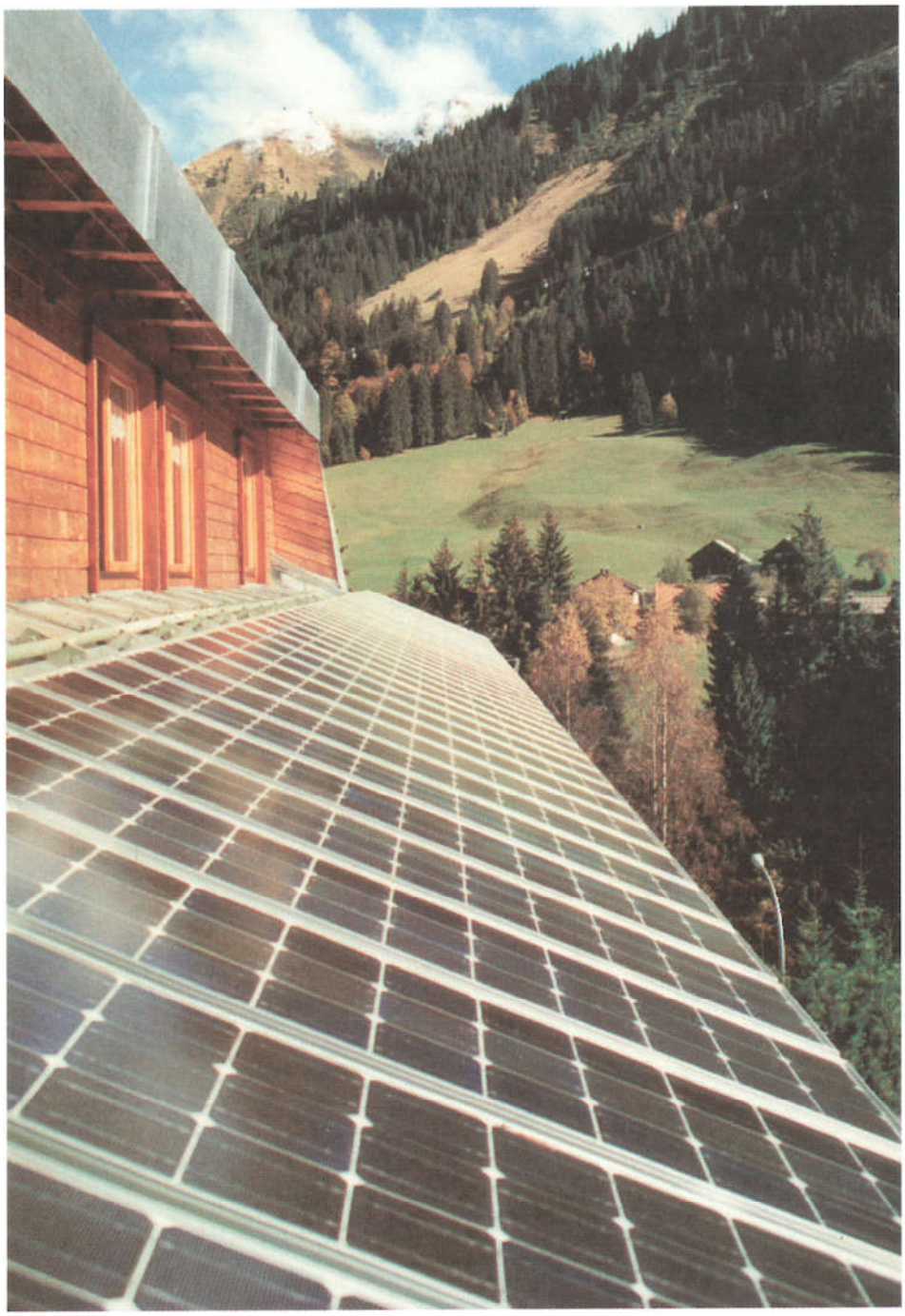
[197] Pri fotonaponskom korištenju Sunčeva zračenja je, dakle, prosječni stupanj djelovanja samo oko 10%; za jedan kilovatsat dobiven iz sunčanih ćelija treba izložiti toliko ploštine da bude osunčana s deset kilovatsati.

[198] U njemačkim prilikama trajanje iskorištenja vjetroelektrana je 1300-1500 sati godišnje, dakle u samo 15-tak posto ukupnog godišnjeg trajanja (8760 sati) bi se u njima proizvela sva energija kada bi one radile punom snagom, a ostalo vrijeme bi stajale. Naravno, u realnim prilikama one rade negdje između te dvije krajnosti.

Slika 25.1. Vjetreni park off-shore (izvan obale) u Irskoj

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.

Veća količina električne energije ne može se ekonomično akumulirati u akumulatorima, jer bi oni bili velikih masa i time preskupi, tako da se praktički kod svih drugih obnovljivih izvora poseže za elektroenergetskim sustavom kao pričuvnim rješenjem ili – u izoliranim



Slika 25.2. Fotonaponski paneli na krovu austrijske planinarske kuće

prigodama – za dizel-generatorom. (Ogrjevno drvo, biomasa i otpaci te geotermalna energija ne traže takvu rezervu, kao što je već rečeno.)

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, koja će – k tome – biti slabije iskorištena jer neće raditi u razdobljima kada je nekonvencionalni izvor raspoloživ. Te će se njezina proizvodnja obavljati uz prosječno niži stupanj iskorištenja goriva, jer se agegati vrte uz manji stupanj djelovanja, a prosječna cijena njezine proi-

zvodnje će biti povećana, jer se stalni troškovi dijele na manju proizvodnju. Regulacijska svojstva takve rezerve moraju biti iznimno visoka jer je za dio nekonvencionalnih izvora karakteristična njihova brza a nepredvidljiva promjena[199].

U Austriji troše za dobavu energije uravnoteženja iz konvencionalnih elektrana, kada izostane eko-proizvodnja, dodatno i još 1,00–1,50 eurocenta po svakom kilovatsatu proizvedenom u vjetroelektranama uz otkupnu cijenu od 7,80 eurocenta/kWh iz tih vjetroelektrana i još oko 0,50 eurocenta po svakom kilovatsatu iz malih hidroelektrana uz otkupnu cijenu od 3,15–6,25 eurocenta/kWh iz malih hidroelektrana (2005).

Prijenosna električna mreža, koja povezuje područja takvih nekonvencionalnih izvora s područjima u kojima je konvencionalna rezerva, također mora biti pojačana. Opterećenja pojedinih vodova mijenjaju se jednom posve novom dinamikom. Opterećenja su po smjeru i veličini u sustavu sa samo konvencionalnim elektranama bila uglavnom unaprijed razmatrana i planirana, te su se promjene tih opterećenja u normalnom pogonu događale relativno sporo i svakako kontrolirano od strane operatora sustava. Međutim, u sustavu s naglašenijim udjelom nekonvencionalnih izvora, a takav će postupno postajati svaki elektroenergetski sustav, teško predvidiva, donekle hirovita ili čak nepredvidiva odstupanja od očekivane proizvodnje nekonvencionalnih izvora, poteze u prijenosnoj mreži znatno izažu tim promjenama. Sve do nastupa iznenadnog zagušenja na kritičnim pravcima u mreži, dakle i potrebe radikalnog pojačanja tih dijelova mreže, uz njihovo slabije ukupno godišnje iskorištenje.

Znakovit je recentni primjer Austrije. Glavna zagušenja u austrijskoj prijenosnoj mreži javljaju se na pravcima sjever-jug, to veća što je veći porast instalacija vjetroelektrana na sjeveru. Njihov je rast rapidan: dok ih je početkom 2005. godine bilo ukupno 400 MW u pogonu, sredinom godine već ih je bilo 680 MW u pogonu, a u ljeto 2006. godine očekuju 1000 MW! Austrijanci se zalažu za zakonsko ograničenje njihove ukupne gradnje u Austriji, jer bitno *troše* regulacijsku moć austrijskog sustava i bitno sudjeluju u riskantnim zagušenjima prijenosne mreže. Primjerice, u srpnju 2005. godine je gotovo trenutni nedostatak snage u sustavu bio 400 MW, jer je iznenada zastao vjetar, i samo slučajno je austrijski sustav spašen od raspada.

Europska Unija i Hrvatska

Europska Unija usvojila je Direktivu o obnovljivim izvorima (2001/77/EC), koja predstavlja obvezu za zakonodavstva zemalja-članica EU-a. U brutopotrošnji električne energije u 1997. godini bio je prosječni udio obnovljivih izvora 13,9 posto. Prema toj smjernici, taj se udio mora u 2010. godini prosječno podići na 22,1 posto. Pri tome su zadaće pojedinih zemalja različite, ovise o zatečenom udjelu, objektivnim mogućnostima za njezinu bržu ili sporiju promjenu, te različitim obvezama pojedine zemlje u odnosu na protokol iz Kyota[200]. Nakon prijema 10 novih članica Europske Unije, došlo je do nadopune Direktive 2001/77/EC, obuhvatom i tih zemalja zadaćom povećanja udjela obnovljivih izvora. Sveukupno, u svih 25 zemalja-članica EU-a s udjela od 12,9 posto u 1997. godini treba postići udio od 21 posto u 2010. godini. Pri tome su opet zatečena stanja i zadaće raznolike po državama.

---

[199] U Njemačkoj, gdje je 2004. godine bilo ukupno oko 14600 megavata vjetroelektrana u pogonu (najviše u svijetu), moraju za svaki megavat u vjetroelektranama držati u rezervi još 0,85 megavata u konvencionalnim elektranama.

[200] Protokol iz Kyota, dokument što su ga države zaključile o smanjenju emisije štetnih, stakleničkih plinova u atmosferu, a koji je stupio na snagu u 2005. godini i obvezuje zemlje koje su ga ratificirale, primjerice sve zemlje EU-a, te Rumunjsku i Bugarsku, Japan, Kanadu i Rusiju. SAD su istupile iz tog dogovora.

Za Hrvatsku, u kojoj je taj udio 1997. godine bio oko 40 posto (vrlo visok, samo su Austrija, Švedska i Latvija među članicama EU-a imala viši!) treba reći samo to da je u referentnoj godini riječ isključivo o obnovljivoj proizvodnji u velikim hidroelektranama, te da je varijacija proizvodnje u tim elektranama u nas vrlo visoka; godišnje proizvedemo 3,5 TWh (u sušnoj godini) i čak dvostruko više, 7 TWh (u vlažnoj godini), prosječno oko 5 TWh (u srednje vlažnoj godini).

Strategija energetskog razvitka Hrvatske, donesena je 2002. godine i – ovisno upravo o mogućem budućem tretmanu obnovljivih izvora energije – razrađena je u tri moguća razvojna scenarija: (1) konvencionalne tehnologije i bez aktivnih mjera države, (2) nove tehnologije i aktivne mjere države i (3) izrazito ekološki scenarij. Scenarij (1) vodi udjelu obnovljivih izvora u 2030. godini kakav je ostvaren u 2000. godini. Nakon pristupa Europskoj Uniji to neće biti moguće! Scenarij (2) vodi nešto većem udjelu u 2030. godini od onoga kakav bi se očekivao u nas 20 godina ranije (2010. godine)! Samo nas scenarij (3) vodi potencijalnom ispunjenju zahtjeva Europske Unije! Dakle i naglašenijem pozicioniranju prijenosne mreže u razvojnim zadaćama, zbog okolnosti koje su upravo opisane.

26

Povijest prijenosa električne energije u Hrvatskoj

Početak prijenosa elekrične energije organiziranog kao posebne i samostojeće djelatnosti elektroprivrede u Hrvatskoj zbio se 1956. godine[201] i proteklih pedeset godina od tada obilježavamo – između ostalog – i ovom knjigom.

Međutim, postavlja se pitanje što je bilo do tada. Da li prijenos električne energije promatrati povijesno prema naponskoj razini mreže, pa kazati da prijenos počinje pojavom prvog voda napona 110 kV. Odmah se javlja dopunsko pitanje: koji teritorijalni okvir pri tome uzeti u obzir? Taj odgovor, premda moguće dvojben, ipak je relativno jednostavan, ali mora se na početku kazati: uzimamo u obzir teritorij *sadašnje* Republike Hrvatske. Ostaje još i mogućnost funkcionalnog povijesnog pristupa; kada je prvi put proizvodnja neke elektrane prenesena vodom na znatniju udaljenost. Ili kada su prvi put dvije elektrane, svaka u svom gradu/naselju, povezane vodom za međusobnu ispomoć. Ili kada je prvi put neka elektrana povezana vodom za elektroenergetski sustav, a izgrađena za potrebe sustava u cjelini – ne isključivo određenog velikog potrošača ili određenog grada/naselja u svojoj okolini.

Ostavljajući po strani opredijeljenje za jedan odgovor, opišimo povijesni hrvatski odgovor na svako od postavljenih pitanja.

- Premda su neki gradovi ili mjesta dobili ranije elektranu, javnu ili mješovitu (za javnu i industrijsku opskrbu), Vodnjan (1889.), Đurđenovac (1891.), Rijeka (1892.), Čakovec (1893.), Bakar (1894.) i Zadar (1894. godine), ipak se za Dan Hrvatske elektroprivrede uzima 28. kolovoza, jer je to datum kada je 1895. godine proradila javna hidroelektrana Krka (320 kVA, 42 Hz), vod duljine 11 kilometara, napona 3 kV i transformacija u gradu Šibeniku na napon 110 V. Dakle: elektrana izmjenične struje, visokonaponski prijenos na daljinu, transformacija, i distribucija pri niskom naponu.
- Godine 1930. došlo je do povezivanja Zagreb–Karlovac, vodom duljine 55 kilometara pri naponu 30 kV, radi međusobnog dopunjavanja hidroelektrične proizvodnje u Karlovcu (HE Ozalj, tadašnje snage 3,5 MVA) i termoelektrične proizvodnje u Zagrebu (tada: 44,5 MVA instalirane snage).
- Godine 1939. pušten je u pogon vod 132 kV Opicina–Matulji i TS 132/50 kV Matulji, te je to godina početka primjene «pravog» prijenosnog napona na području sadašnje Hrvatske.
- Godine 1943. izgrađen je vod 110 kV Brestanica (Slovenija)–Zagreb, najprije u pogonu pod naponom 30 kV do zagrebačke elektrane, da bi 1949. godine počelo njegovo korištenje pod naponom 110 kV, na potezu Brestanica–Sv. Klara.
- Godine 1952. stavljen je u pogon prvi agregat HE Vinodol i vod 110 kV Vinodol–Zagreb (Rakitje). Tijekom 1953. godine priključena su i preostala dva agregata u HE Vinodol, te je ostvarena konačna snaga od 84 MW. To je prva elektrana u Hrvatskoj građena za elektroenergetski sustav u cjelini, a ne samo za lokalne potrebe.

[201] Početkom 1956. godine osnovano je poduzeće Elektroprenos-Split za područje Dalmacije, a krajem 1956. godine i Elektroprenos-Zagreb, s pogonima Istra, Slavonija i Zagreb, u okviru tadašnje Zajednice elektroprivrednih poduzeća Hrvatske.

Regionalni elektroenergetski sustavi

U pojedinim područjima-regijama Hrvatske, moguće je sagledati stanovito svojstveno profiliranje tijekom razvoja elektrifikacije, uvjetovano okolnostima – prirodnim, povijesnim, gospodarskim i razvojnim osobitostima tih područja. U svakoj je regiji došlo je do prvobitnog povezivanja u regionalni elektroenergetski sustav, prije priključenja elektroenergetskom sustavu zemaljskog obuhvata. Takvo obuhvatnije ili manje obuhvatno povezivanje značilo je ekonomičniju i pouzdaniju opskrbu električnom energijom, te je bitna odrednica u napretku elektrifikacije.

Regionalni elektroenergetski sustavi pri naponu povezivanja do 50 kV i s ukupnom instaliranom snagom od nekoliko desetaka do stotinjak megavata, dočekali su povezivanje u sustav zemaljskog obuhvata. Zbog longitudinalna zemljopisna oblika i sedamdesetgodišnje državne uključenosti u okvire šire od hrvatskog područja, uzdužna hrvatska povezanost kasno je ostvarena. Pedesetih godina (1952.) povezano je Hrvatsko primorje i Istra sa središnjim dijelom Hrvatske pri naponu 110 kV. Početkom šezdesetih godina (1962.) povezan je pri naponu 220 kV središnji dio s Dalmacijom, ali ne do Dubrovnika (koji je tek 1989. godine povezan pri naponu 110 kV na hrvatskom području). Tek krajem sedamdesetih godina (1978.), Slavonija i Baranja povezani su sa središnjim dijelom Hrvatske pri naponu 400 kV, dok su na naponskoj razini 110 kV povezani kasnije (1980. i 1984. godine).

U Istri je javna elektrifikacija pretežitog broja naselja već od druge polovine dvadesetih godina prošlog stoljeća oslonjena na dobavu iz elektroenergetskog sustava sjeverne Italije mrežom 50 kilovolta, bez prethodne gradnje lokalnih elektrana. Čitava istarsko-riječka visokonaponska mreža, s termoelektranama u Rijeci i Vlaškoj, bila je krajem tridesetih godina vezana na talijanski elektroenergetski sustav frekvencije 42 Hz. Osnovno opskrbno čvorište postala je TS 132/50 kV Matulji, te vod 132 kV Opicina–Matulji, pušteni u pogon 1939. godine. Prva je zadaća, nakon Drugog svjetskog rata, bila odijeliti mrežu od talijanskog sustava, prijeći na naš standardni napon 110 kV i frekvenciju 50 Hz. Izgradnjom provizorne transformatorske stanice u Sežani prekinuta je veza istarske i talijanske mreže i učinjen je prijelaz na napon 110 kV. Krajem 1951. godine cijela je Istra, osim ugljenokopa Raša i Bujštine, prebačena na frekvenciju 50 Hz i time u sustav Slovenije i sjeverozapadne Hrvatske.

U Hrvatskom primorju, Gorskom kotaru i Lici brojne su mjesne elektrane radile nepovezano – terenske okolnosti i mala gustoća naseljenosti (Lika, otoci) objektivno su otežavali povezivanje. Do povezivanja, ali samo Rijeke i užeg područja, s elektroenergetskim sustavom sjeverne Italije dolazi neposredno prije Drugog svjetskog rata (1939.) a područje povezivanja se donekle širi nakon Drugog svjetskog rata, do Delnica. U Lici i podvelebitskom kraju formira se odvojeno područje povezivanja, krajem pedesetih godina prošlog stoljeća.

U središnjoj Hrvatskoj došlo je već 1930. godine do povezivanja Zagreb–Karlovac, pri naponu 30 kV, ponajprije radi osiguranja rastuće potražnje Zagreba i međusobnog dopunjavanja hidroelektrične proizvodnje u Karlovcu i termoelektrične proizvodnje u Zagrebu, što je poticalo i raniji razvoj lokalnih mreža za opskrbu drugih mjesta na čitavom području. Time je nastala prilično razgranata mreža elektroenergetskog sustava Zagreb–Karlovac i zagorska mreža vezana na Sloveniju. Da se omogući veća dobava energije iz Slovenije, izgrađena je provizorna TS 110/30 kV Sv. Klara, odakle je vod prema Brestanici – izgrađen u Drugom svjetskom ratu, 1949. godine stavljen pod napon 110 kV. Veza zagorske mreže sa Slovenijom, putem voda 35 kV, bila je preslaba za nagli porast opterećenja i širenje mreže, pa je izgrađen

vod 110 kV iz Nedeljanca, kraj Varaždina, do Maribora i TS 110/30 kV Nedeljanec, 1952. godine. Značajna energetska pomoć Zagrebu otpočela je 1952. godine, kad je stavljen u pogon prvi agregat HE Vinodol i vod 110 kV Vinodol–Zagreb (Rakitje). Tijekom 1953. godine priključena su i ostala dva agregata u HE Vinodol, te je ostvarena konačna snaga od 84 MW. To je prva elektrana u Hrvatskoj građena za elektroenergetski sustav, a ne prvenstveno za lokalne potrebe. Godine 1954. završen je dalekovod 110 kV Zagreb (Rakitje)–Varaždin (Nedeljanec), a na vod je priključen i agregat TE Jertovec (Konjščina, 15 MW, od ukupne snage 40 MW).

U Dalmaciji je nekoliko većih hidroenergetskih objekata ponajprije izvedeno radi neposredne opskrbe industrije (karbida, cementa, cijanamida) i ugljenokopa: HE Jaruga II (1903. godine, 5250 kVA), HE Manojlovac (Miljacka, prvi agregat 1906. godine, ukupna konačna snaga četiri agregata 21 MVA), HE Vrilo (Majdan, 1908. godine, 1200 kVA), HE Roški slap (1909. godine, 1000 kVA) i HE Kraljevac (1912. godine, 32 MVA). U stanovitoj mjeri, uspostavljaju se i odnosi s lokalnom zajednicom radi javne isporuke električne energije, ali često znatno kasnije od početka industrijskoga korištenja tim elektranama. Stoga je početna mjesna elektrifikacija i ovdje ostvarivana gradnjom lokalnih elektrana. Prestankom ratnih operacija u Drugom svjetskom ratu u Dalmaciji, već ujesen 1944. godine prišlo se osposobljavanju mreže, jer su u tom dijelu Hrvatske razaranja bila najveća. Nakon nužnih popravaka i mnogih improvizacija, osposobljene su postojeće elektrane i vodovi, a sredinom 1948. godine završen je dalekovod 110 kV, u pogonu pod naponom 50 kV, HE Kraljevac–TS Lozovac. Time je stvoren srednjodalmatinski elektroenergetski sustav u kojem su paralelno radile hidroelektrane Kraljevac, Manojlovac i Jaruga. Zatim su građeni vodovi 110 kV Kraljevac–Dugi Rat, Kraljevac–Mostar, pa vod Kraljevac–Split–Šibenik, s pripadnim transformatorskim stanicama. Do 1953. godine potpuno je napušten napon 50 kV i nadomješten vodovima pod naponom 110 kV.

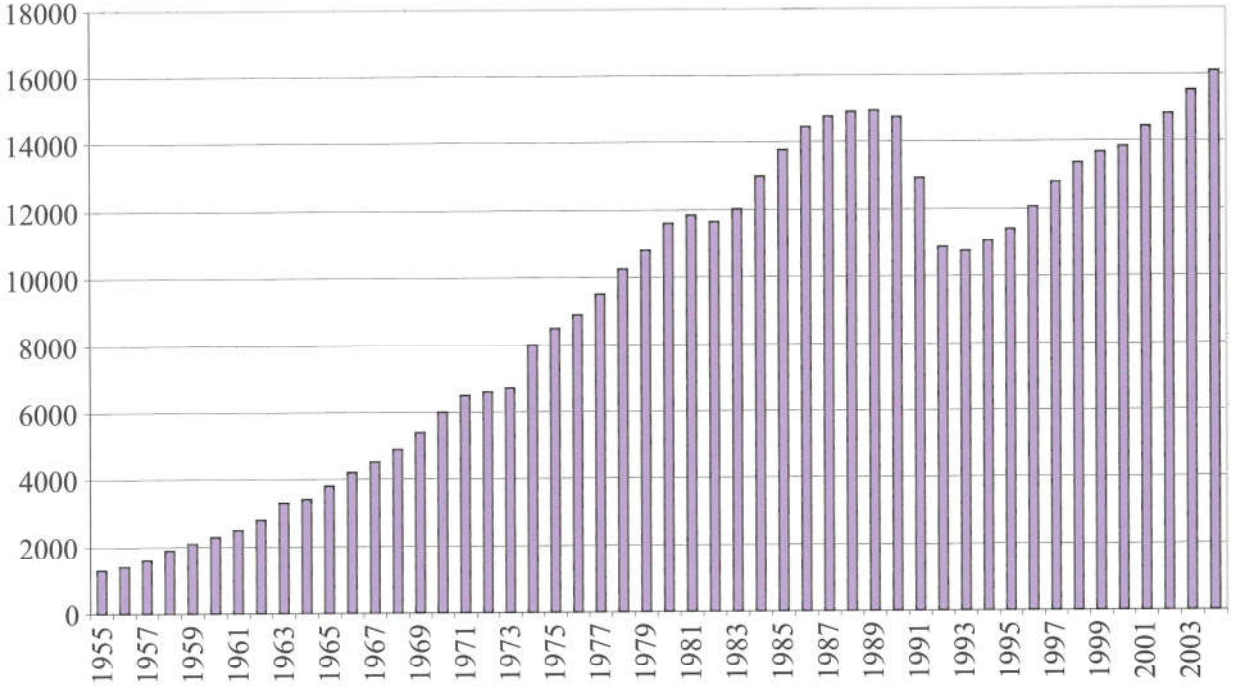
Dakako, otoci duž cijele jadranske obale u početno su doba odvojeno elektrificirani. Tek u drugoj polovici pedesetih godina prošlog stoljeća dolazi i do uključenja većih otoka u elektroenergetski sustav, srednjonaponskim podmorskim kabelima. Tijekom 1994. godine okončano je uključenje tih otoka u sustav na naponskoj razini 110 kilovolta ("otočna veza": Krk–Rab–Pag).

U Slavoniji i Baranji došlo je do povezivanja u regionalni elektroenergetski sustav tek nakon Drugog svjetskog rata, ponajprije zbog nepostojanja primarnih izvora energije za podmirivanje veće potražnje. Moralo se uzdržavati stanje uglavnom pojedinačnih-mjesnih elektrana u većim mjestima i ne poticati širenje elektrifikacije. Da se iskoriste na najbolji način, povezane su elektrane u Osijeku, Borovu i Vinkovcima vodovima 35 kV. Povezivanje je počelo 1947. godine, a priključkom TE Županja 1954. godine formiran je mali slavonski elektroenergetski sustav (slika 9.1). Okolnosti su se privremeno poboljšale kad je stavljen u pogon vod 110 kV od Doboja do Slavonskog Broda (1956.), a zatim do Osijeka (1957.) s transformatorskim stanicama 110/35 kV u oba grada.

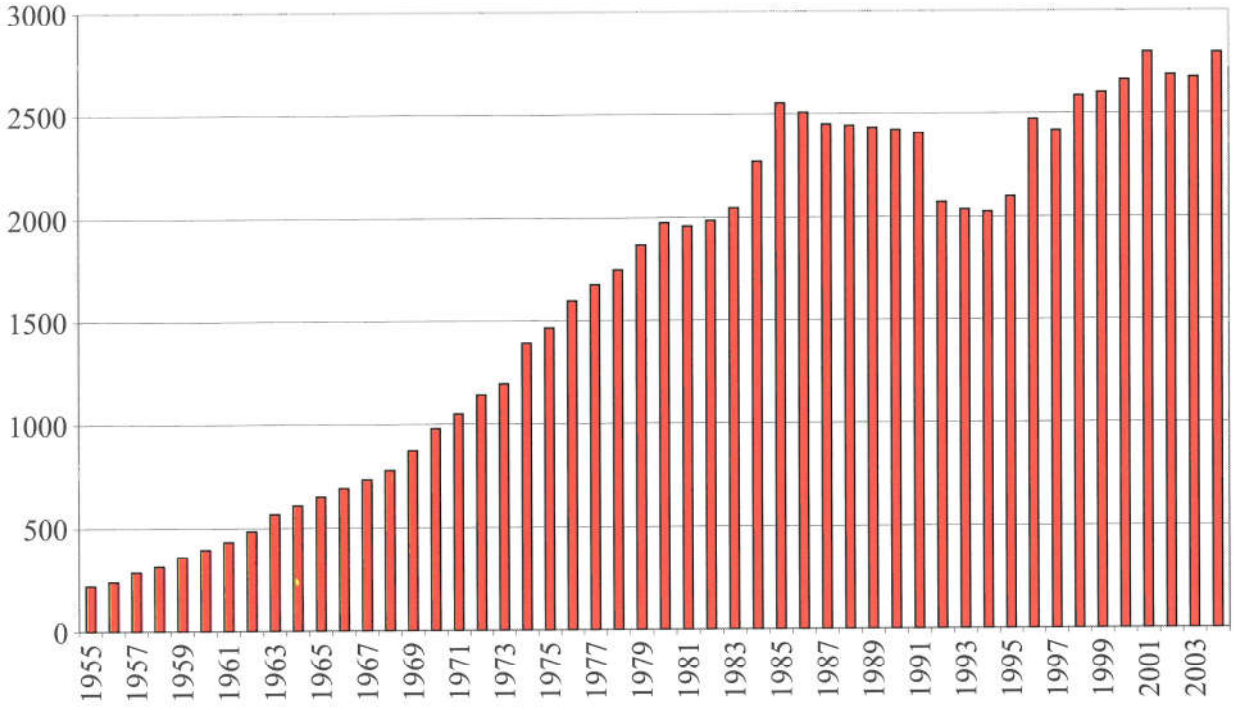
Zemaljski elektroenergetski sustav

Elektrifikacija se širila, a opterećenje naglo raslo, pa se ponovno pokazalo da u središnjoj Hrvatskoj manjka električne energije. Kako su se u Bosni pojavili energetski viškovi, odlučeno je da se na trasi Jajce–Zagreb izgradi vod 110 kV s dvije trojke, predviđen za prijelaz na napon 220 kV. Početkom 1957. godine pod napon je stavljena jedna trojka i odvojeno (radijalno) je napajala novu TS 110/30 kV Resnik. Nakon opsežnih priprema, u prosincu 1957. godine, u

Zagrebu su spojeni u paralelni rad elektroenergetski sustavi zapadnog i istočnog dijela države, putem obje trojke tog 110 kV voda. Time je cijela tadašnja Jugoslavija (bez Makedonije i Kosova) imala jedinstveni elektroenergetski sustav na razini 110 kilovolta.



Slika 26.1. Potrošnja na razini prijenosne mreže 110 kV *Hrvatske, uključeni gubici u mreži* (GWh)



Slika 26.2. Vršno opterećenje na razini mreže 110 kV *Hrvatske* (MW)

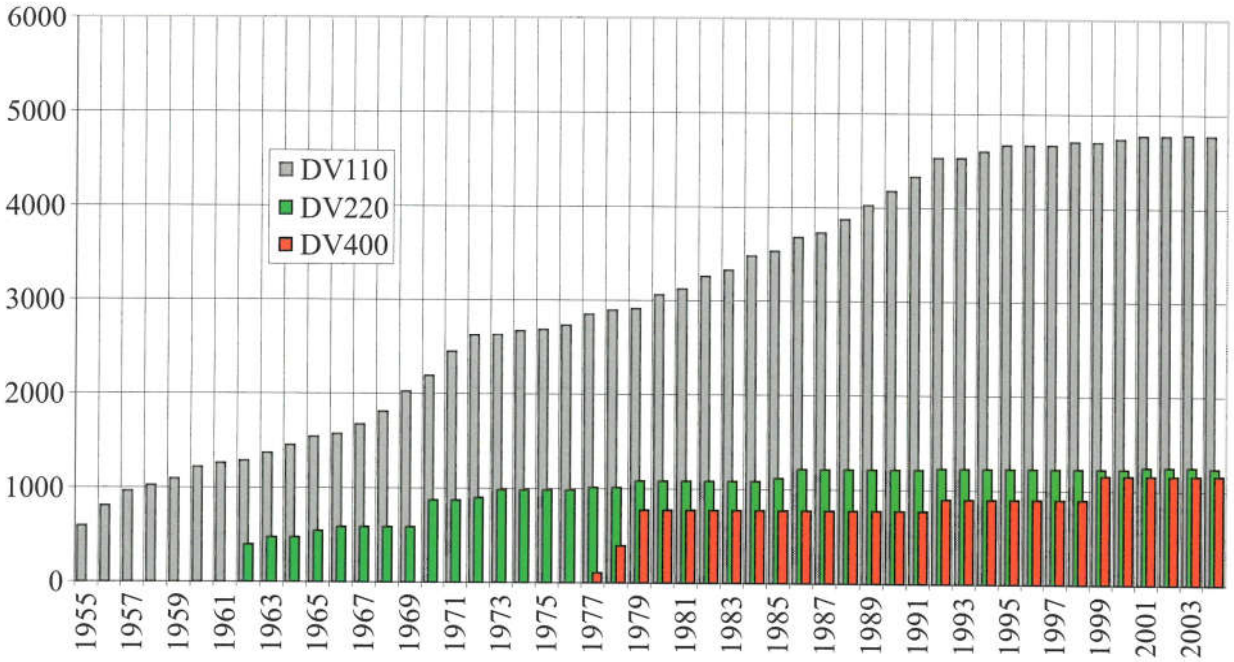
Na naponskoj razini 110 kV ipak nije postojao jedinstven *hrvatski* elektroenergetski sustav. On je bio grupiran u tri dijela, odijeljena na teritoriju Hrvatske, ali povezana preko Bosne i Hercegovine: slavonski dio, dio koji obuhvaća središnju Hrvatsku s Gorskim kotarom, Hrvatskim primorjem i Istrom, te Dalmaciju (uz izdvojeno područje Dubrovnika, vezano vodom 35 kV na hercegovačku mrežu). U to vrijeme, u pogon su stavljene HE Gojak (48 MW, 1959. godine) i HE Peruča (42 MW, 1960. godine).

Intenzivni porast potrošnje električne energije ukazivao je na skoru potrebu uvođenja superponiranog napona 220 kV. Studije o planiranju jugoslavenske superponirane mreže bile su pedesetih godina vrlo intenzivne. Konačno, 1959. godine odobrena je trasa voda 220 kV Zakučac–Senj (Brinje)–Zagreb, duljine 354 km. Vod je stavljen u pogon početkom 1962. godine, kad je proradila nova HE Zakučac (prva etapa, 2×108 MW). Time su povezani elektroenergetski sustavi Dalmacije i središnje Hrvatske.

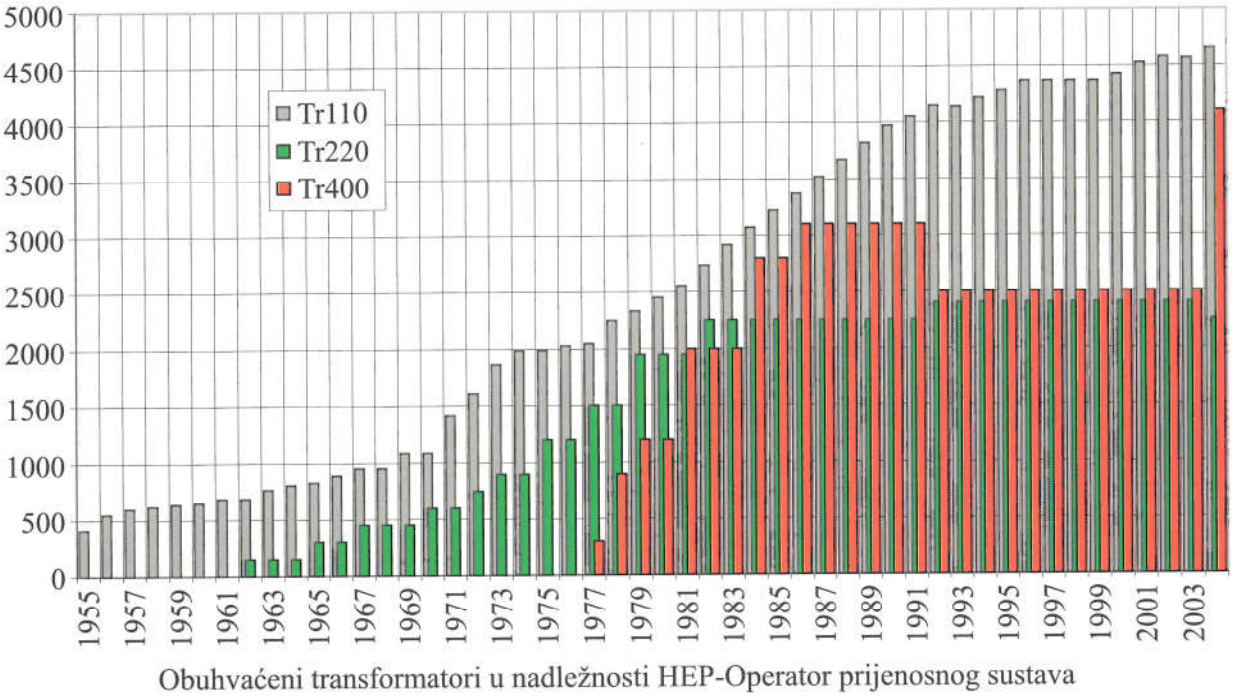
Godine 1964. osnovana je regionalna skupina SUDEL, jugoistočnih elektroenergetskih sustava u okviru UCPTE-a, unutar koje se ostvaruje sinkroni pogon tadašnje jugoslavenske prijenosne mreže s Italijom od 1974. godine, s Austrijom od 1975. godine, te s Grčkom od 1976. godine.

Spoj sa Slavonijom na hrvatskom području ostao je samo na naponskoj razini 35 kV (vod Međurić–Nova Gradiška–Slavonski Brod). TS 220/110 kV Đakovo vezana je 1967. godine na bosansku mrežu jednim vodom 220 kV, a 1972. godine drugim takvim vodom (slika 26.3).

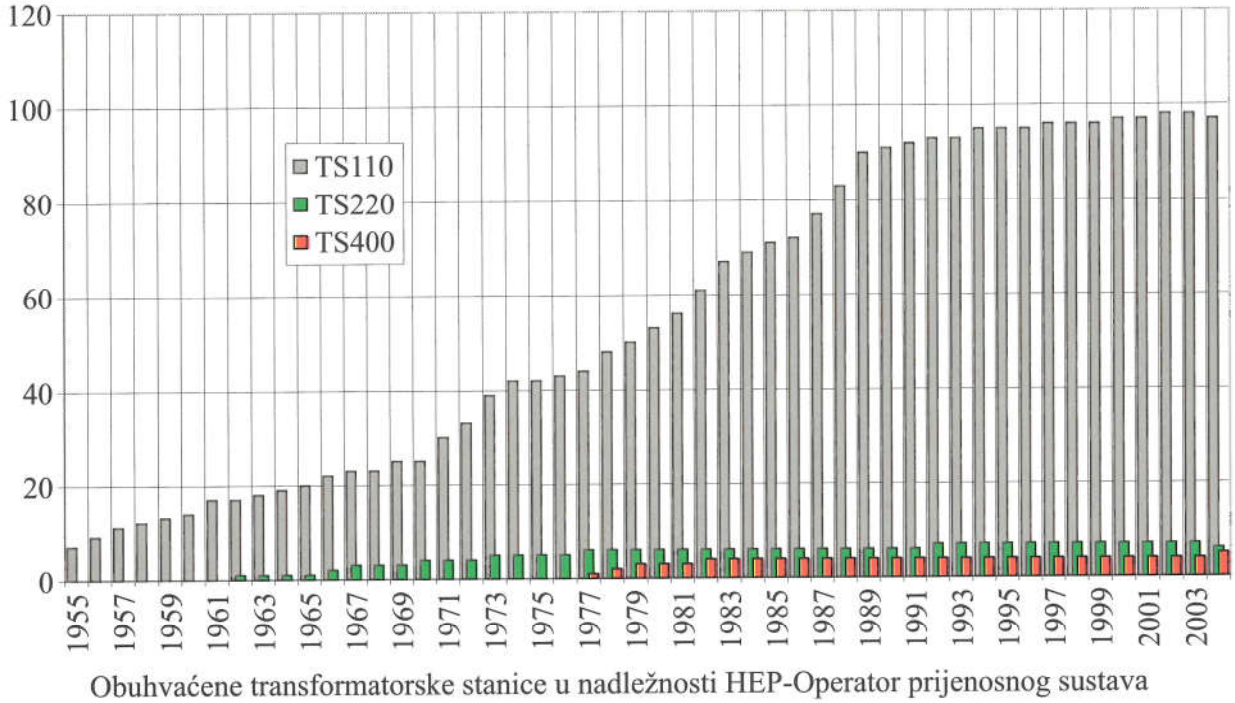
Nakon stavljanja u pogon prvog voda 220 kV u Hrvatskoj, mreža 220 kV širila se još idućih deset godina. Zatim stagnira, jer je uvođenjem napona 400 kV na toj naponskoj razini izgrađivana osnovna prijenosna mreža i interkonekcijski vodovi. Do izgradnje mreže 400 kV, u Hrvatskoj su izgrađene brojne elektrane: 1962. godine TE-TO Zagreb (64 MW), 1965. godine HE Senj (216 MW) i HE Dubrovnik (216 MW), 1968. godine HE Rijeka (37 MW), a 1970. godine HE Sklope (23 MW), TE Plomin I (125 MW), TE Sisak (prva etapa, 210 MW)



Slika 26.3. Duljine dalekovoda u prijenosnoj mreži Hrvatske (km)



Slika 26.4. Instalirana snaga transformatora u prijenosnoj mreži Hrvatske (MVA)



Slika 26.5. Broj transformatorskih stanica u prijenosnoj mreži Hrvatske (kom)

i EL-TO Zagreb (prva etapa, 12 MW). Od 1973. godine u pogonu je HE Orlovac (237 MW). Od 1974. godine u pogonu je i prva elektrana izgrađena sredstvima Hrvatske izvan područja Hrvatske, TE Tuzla IV (210 MW), a od 1975. godine HE Varaždin (94 MW). Godine 1976. interventno se završava PTE Osijek (50 MW), kao i PTE Jertovec (25 MW).

Mreža 400 kV izgrađena je kao prsten koji povezuje sva područja tadašnje Jugoslavije. Vodovi i postrojenja na području Hrvatske samo su dijelovi tog sustava. Prvi terenski radovi na izgradnji mreže 400 kV počeli su 1974. godine. Sjeverna magistralna linija Obrenovac–Ernestinovo (Osijek)–Tumbri (Zagreb)–Maribor, stavljena je u pogon sredinom 1978. godine, čime je slavonsko-baranjska mreža povezana sa središnjom Hrvatskom. Južna magistrala, Mostar–Konjsko (Split)–Melina (Rijeka)–Divača (Slovenija) u pogonu je pod naponom 400 kV od 1979. godine (slike 26.4 i 26.5).

Godine 1978. ide u pogon TE Rijeka (320 MW), zatim 1982. godine HE Čakovec (76 MW), 1984. godine pumpno-akumulacijska hidroelektrana Velebit (276 MW u turbinskom radu), 1985. godine TE-TO Osijek (električne snage 45 MW), te 1989. godine HE Dubrava (76 MW). Od godine 1981. u pogonu je NE Krško/Slovenija, 50 posto u vlasništvu Hrvatske elektroprivrede, što znači 354 MW, od ukupno 708 MW sadašnje instalirane snage u toj elektrani.

Konačan svoj predratni oblik, hrvatski elektroenergetski sustav dobio je završetkom izgradnje voda 400 kV Melina–Tumbri 1992. godine. Područje Dubrovnika povezano je 1963. godine na naponskoj razini 110 kV prema Mostaru, a od 1989. godine prema srednjoj Dalmaciji vodovima 110 kilovolta duž hrvatskog područja.

Procjenjuje se da je u ratu 1991/92. godine, ratnim razaranjima ili privremenom okupacijom, devastirano u većoj ili manjoj mjeri oko trećine prijenosne i distribucijske mreže Hrvatske elektroprivrede, kao i petina elektrana, što dakako nije ravnomjerno raspoređeno čitavim državnim teritorijem. Primjerice, u prijenosnoj mreži Slavonije i Baranje raspo-

Slika 26.6. Privremena transformacija 220/110 kV, 150 MVA *u Slavoniji, 1992. godine*

loživa je bila približno trećina mirnodopskih mrežnih kapaciteta a tim kapacitetima opskrbljivalo se više od dvije trećine mirnodopske potražnje električne energije. Dakako, uz naglašeno smanjenu pouzdanost i prigušenu kvalitetu električne energije te izgradnju niza privremenih objekata (ukupno 40 kilometara vodova 220 i 110 kV na drvenim stupovima, i privremene transformacije 220/110 kV i 110/35 kV) (slika 26.6).

Godine 2000. počinje korištenje TE Plomin II, elektrane zajednički građene sredstvima Hrvatske elektroprivrede i njemačkog RWE-a[202] (210 MW).

Sadašnji elektroenergetski sustav

Sadašnji svoj oblik (2005) hrvatska prijenosna mreža, dobila je izgadnjom DV 400 kV Tumbri–Melina (1992), izgradnjom međudržavnog voda 2×400 kV Žerjavinec–Heviz/Mađarska (1999), te obnovom ratom razorene TS 400/110 kV Ernestinovo i izgradnjom TS 400/220/110 kV Žerjavinec, što je okončano 2004. godine (slika 26.7).

Zanimljivo je prikazati ukupni broj spojnih (interkonekcijskih) vodova 400 i 220 kV prema susjednim državama, jer ti brojni vodovi uvjetovani su naglašeno tranzitnim položajem hrvatske prijenosne mreže u interkonekciji UCTE.

Ukupni broj spojnih vodova iz Hrvatske (2005)

Prema državi	400 kV	220 kV
Bosni i Hercegovini	2	7
Sloveniji	3	2
Mađarskoj	2	-
Srbiji i Crnoj Gori	1	-

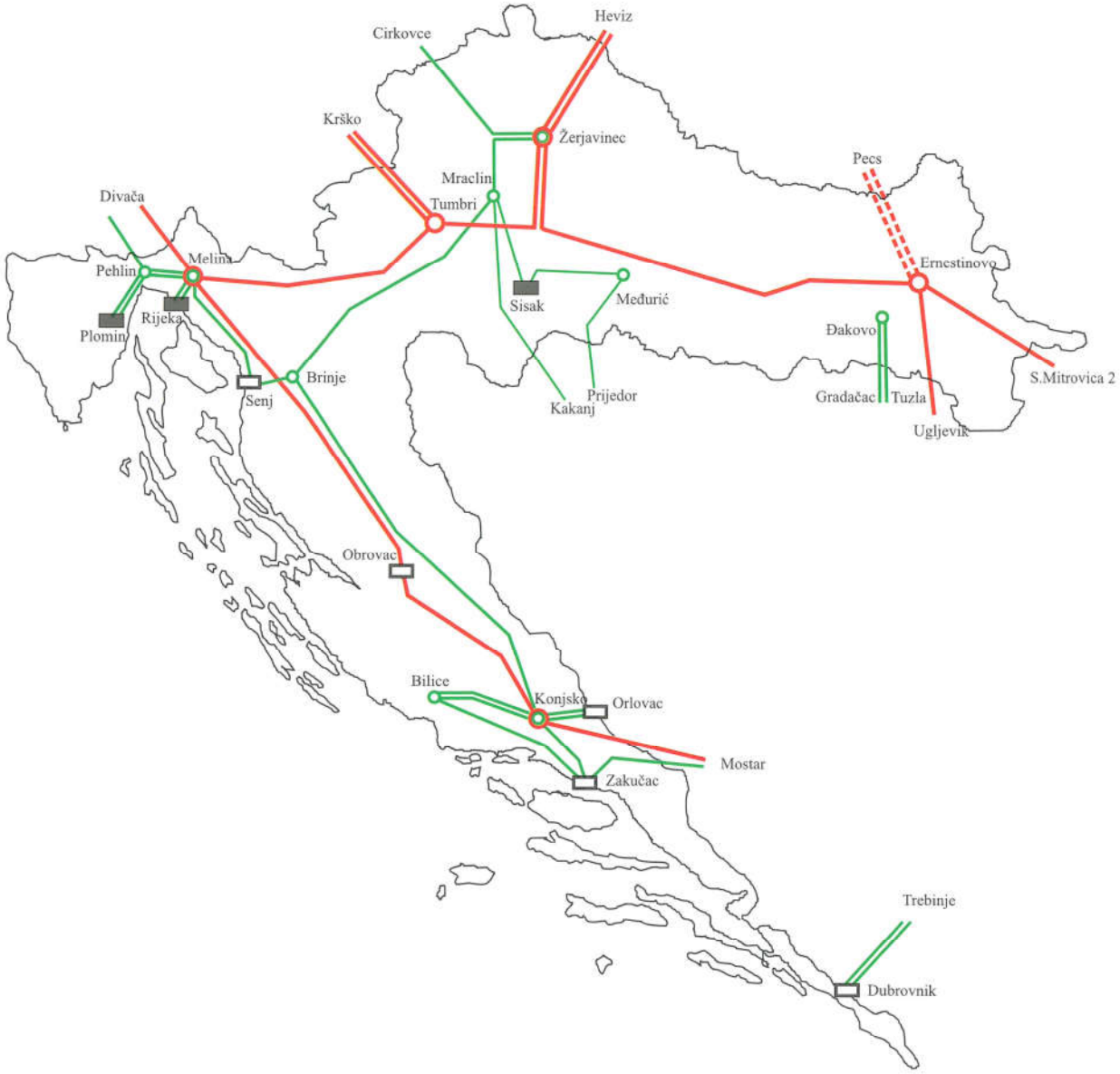
Dakako, postoji i više vodova 110 kV prema susjednim državama, koji se dijelom samo povremeno koriste – u prilikama kada je potrebna ispomoć u područjima bliže granici.

Godine 2004. ukupna je predaja električne energije iz prijenosne mreže Hrvatske elektroprivrede bila oko 15,5 milijarda kilovatsati, uz vršno opterećenje oko 2800 MW (slike 26.1 i 26.2). To je oko 3000 kilovatsati godišnje finalne potrošnje (nakon odbitka gubitaka u distribucijskoj mreži) po prosječnom stanovniku. Što je na donjem rubu među europskim zemljama (poput potrošnje u Litvi i Ukrajini) ili polovina od jednog broja razvijenijih europskih zemalja (Danska, Češka), ili gotovo tri puta manje od potrošnje po stanovniku od nekih drugih europskih zemalja (Austrija, Belgija, Švicarska).

Instalirana snaga elektrana na području Hrvatske 2004. godine bila je oko 3700 MW (oko 2100 MW u hidroelektranama i 1600 MW u termoelektranama), a uz hrvatski dio NE Krško od 354 MW, ukupna instalirana snaga je zaokruženo oko 4000 MW. Elektrane izvan područja Hrvatske izgrađenih sredstvima Hrvatske su ukupne snage 650 MW (u Bosni i Hercegovini, te Srbiji).

Duljine vodova u mreži 2004. godine su: 1160 km (400 kV), 1230 km (220 kV), 4770 km (110 kV), 4000 km (35 kV), 24000 km (10 i 20 kV), te oko 74000 km (0,4 kV). Distribucijskih transformatorskih stanica, u kojima se ostvaruje transformacija srednji napon na niski napon – radi konačnog korištenja električnom energijom, bilo je u mreži gotovo 20 tisuća.

[202] Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerks Aktiengesellschaft



Slika 26.7. Prijenosna mreža 400 *(crveno) i* 220 kV *(zeleno) u Hrvatskoj, 2005.*

Najveća hidroelektrana je Zakučac, na Cetini kod Omiša, instalirane snage 486 MW i moguće godišnje proizvodnje (uz 70-postotnu vjerojatnost dotoka vode) oko 1,4 milijarde kilovatsati – u takvim hidrološkim prilikama ta bi hidroelektrana namirila desetinu hrvatskih potreba. Sljedeće velike hidroelektrane su: PAHE Velebit, HE Orlovac, HE Senj i HE Dubrovnik, svaka snažnija od 200 megavata.

Najveća termoelektrana je TE Sisak, raspoložive snage 410 MW, kojoj je gorivo loživo ulje ili prirodni plin, kao i većini naših termoelektrana. Sljedeće velike temoelektrane su u Zagrebu (EL-TO, 100 MW i TE-TO, 355 MW), u Rijeci (320 MW) i Plominu (I i II, ukupno 315 MW). Dakako, najveća je NE Krško, ali u zajedničkom vlasništvu sa Slovenijom (ukupno 708 MW).

Na kraju, istaknimo jednu nezaobilaznu činjenicu: udio doista velikog broja naših ljudi u zamišljanju, osnivanju, projektiranju, izradi opreme, građenju, montaži, pogonu i održavanju pionirskih (kao što je povezivanje pri naponu 110 kV na potezu Jajce–Zagreb iz 1957.

godine, ili pogon voda pod naponom 220 kV na potezu Zakučac–Zagreb iz 1962. godine, ili izgradnja mreže 400 kV s kraja sedamdesetih godina prošlog stoljeća, ili izgradnja privremenih rješenja za opskrbu električnom energijom povodom razaranja u Domovinskom ratu) i svih idućih elektroprijenosnih pothvata, što je tim ljudima bio, ili i sada jest, životni poziv u pedeset godina organiziranog prijenosa električne energije u nas.

Sagledivi dalji razvoj hrvatske prijenosne mreže

Konačno: kakav je sagledivi dalji razvoj prijenosne mreže u Hrvatskoj u idućih, recimo, dvadesetak godina?

Uz prosječnu stopu rasta potrošnje električne energije od 3,6 posto/god., za dvadesetak godina potrošnja će se u Hrvatskoj udvostručiti ($1{,}036^{20} \approx 2$). Tolika je stopa rasta potrošnje električne energije u vezi s donjom granicom rasta bruto domaćeg proizvoda, za koji se predviđa stopa rasta od 4–5 posto/god., odnosno s rastom kakav se ostvaruje posljednjih godina u Hrvatskoj. Ostvarenjem takva porasta, oko 2025. godine Hrvatska bi prema potrošnji električne energije po stanovniku dostigla sadašnju prosječnu potrošnju po stanovniku svih 25 zemalja Europske Unije (2002. godine: oko 6000 kWh/stan.)!

Dakle, do 2025. godine ili neke od nje ne bitno udaljene godine, trebat će namiriti novu potrošnju jednaku današnjoj potrošnji (oko 15 TWh). Uzme li se u obzir prosječno godišnje trajanje korištenja temeljnih termoelektrana od 5500 sati, proizlazi da će do tog (ili približno tog) vremenskog horizonta trebati izgraditi novih oko 2700 MW u termoelektranama. Dakle, prosječno svakih četiri-pet godina jedan agregat od 550 MW ili ekvivalent toga. (K tome treba dodati i izgradnju elektrana, kojima će se zamijeniti one postojeće elektrane kojima je istekao životni vijek; u razdoblju 2010.–2020. godine ukupna snaga za zamjenu je oko 1200 MW.) To sve ako se uvoz električne energije zadrži na sadašnjoj apsolutnoj razini. Ako se želi smanjiti tolika razina uvoza – a to će postati imperativ, jer će cijena uvozne električne energije rasti – potrebna izgradnja novih elektrana se povećava.

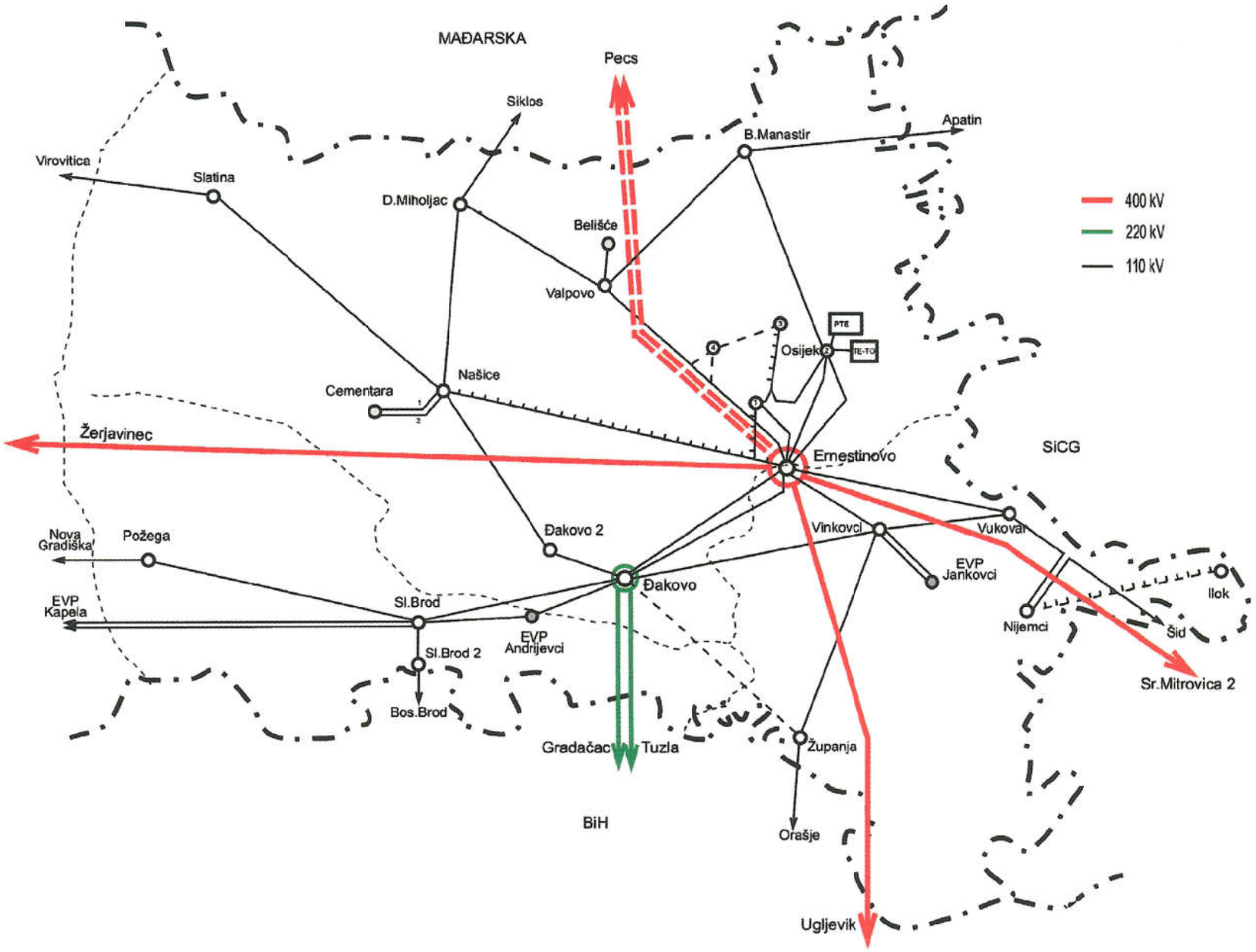
Intenzivnije korištenje elektrana na obnovljive izvore energije, kao i nekih manjih hidroelektrana koje su još preostale za izgradnju, neće bitno smanjiti izgradnju temeljnih termoelektrana[203].

Za sagledavanje mogućeg razvoja prijenosne mreže bitna je i tranzitna uloga hrvatske prijenosne mreže u sklopu europskih dalekih prijenosa električne energije s istoka (Ukrajina, Rumunjska, Bugarska) prema zapadu.

Zamjenske termoelektrane gradit će se na postojećim lokacijama (uglavnom kombinirane plinsko-parne elektrane), a to će zahtijevati pojačanje postojeće evakuacijske mreže (danas uglavnom 110 i 220 kV), možda i novim vodovima višeg napona (400 kV). Moguć broj novih lokacija za velike termoelektrane ograničen je zbog rashladne vode (Sava i Dunav, Jadransko more) ili zbog dopreme uvoznog ugljena brodskim prijevozom (Dunav, morska obala), koje će se zbog velikih snaga svojih agregata (400–600 MW) moći priključiti samo na 400 kV mrežu.

Može se očekivati intenzivnija izgradnja mreže 400 kV na danas već sagledanim i djelomično istraženim potezima kao: Pečuh/Mađarska–Ernestinovo (slika 26.8), pojačanje 400 kV zagrebačkog prstena uz 1–2 nove stanice 400 kV, jedna trafostanica 400/110 kV

[203] Vidi o tome poglavlje 25.



Slika 26.8. Prijenosna mreža u Slavoniji i Baranji, 2005. godine, pedeset godina nakon prikaza na slici 9.1

na sjeveru zemlje (TS Drava), pojačanje 400 kilovoltnog povezivanja prema jugu (Zagreb–Split), ulazak napona 400 kV u Istru, voda 400 kV (početno u pogonu s 220 kV) Zagvozd–Plat (Dubrovnik) s odgovarajućim rasklopištima i drugo. Posebno će zanimljivo biti eventualno pojačanje veza pri naponu 400 kV sa susjednom Bosnom i Hercegovinom, izgradnjom 400 kV poteza od Banja Luke do Zagreba. Time se osjetno dopunjuje potez istok–zapad na sjeveru zemlje (uz postojeći 400 kV vod Ernestinovo–Žerjavinec–Tumbri), što će vjerojatno prolongirati izgradnju takvog novog povezivanja kroz Hrvatsku (posavski ili podunavski pravac).

Ne treba očekivati daljnju dogradnju mreže 220 kV (što je općeeuropska tendencija), s tim da će neki novoizgrađeni vodovi 400 kV biti u početku u pogonu pod naponom 220 kV ili čak 110 kV. Možda će u razmatranom razdoblju doći i do ukidanja nekih 220 kV vodova, osobito na sjeveru zemlje, i do korištenja njihovih trasa (u budućnosti će biti jako teško pronaći nove koridore za visokonaponske nadzemne vodove) za nove vodove 400 kV.

Takvim mogućim razvojem 400 kV mreže u načelu će se riješiti i uključivanje novih velikih termoelektrana u sustav.

Na tako zamišljene mreže 220 i 400 kV priključivat će veoma gusta mreža 110 kV, sastavljena od nadzemnih ali dijelom i podzemnih (podmorskih) kabelskih vodova, te transformatorskih stanica gornjeg napona 110 kV, sa sve većom primjenom metalom oklopljenih postrojenja 110 kV ispunjenih sumporovim heksafluridom. Dakako da će gustoća prijenosne mreže 110 kV biti veća u zonama koncentrirane potrošnje, kao što su velike gradske aglomeracije.

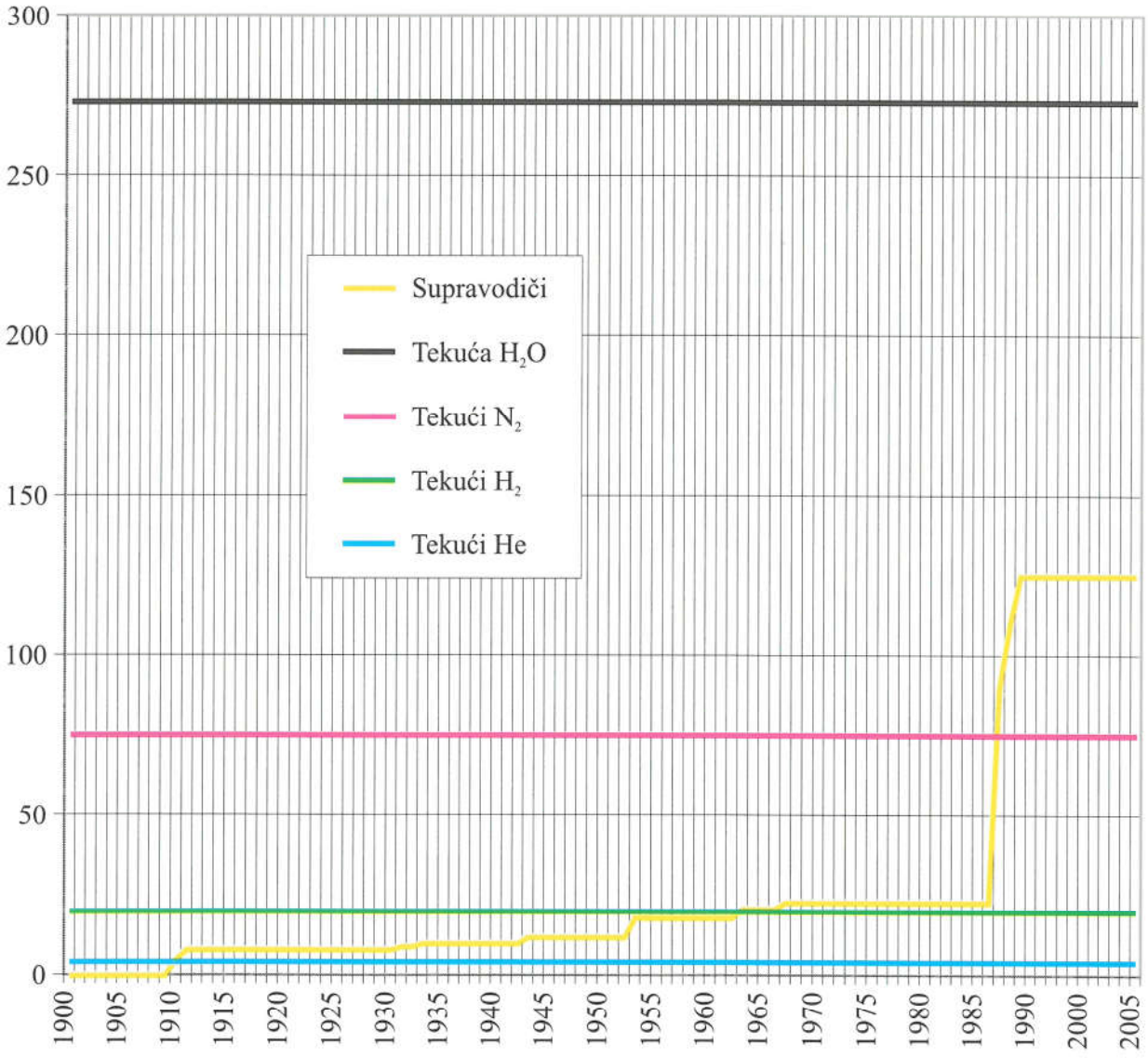
U narednom razdoblju još će jedna činjenica snažno utjecati na investicijske aktivnosti u prijenosnoj mreži Hrvatske, a to je potreba zamjene istrošenih komponenata prijenosne mreže zbog starenja opreme i objekata te mreže. Naime, životni vijek većine komponenata u toj mreži kraći je od 50 godina (za dio visokonaponske opreme 20–25 godina), a kako su najstariji objekti u njoj prešli tu starost – slijede ozbiljna i trajna ulaganja u njezinu revitalizaciju.

27

Budućnost prijenosa električne energije

Širi okvir za razmatranje mogućih puteva razvoja prijenosa električne energije u narednih, recimo, pedesetak godina otvara se samo uz moguće brojne pretpostavke. Ponajprije: o rastu količine ukupne potražnje svekolike energije, pa onda i električnog njezina oblika u tome, u vezi s nužnošću prigušivanja emisije ugljikova dioksida u atmosferu. Na drugoj strani: o napretku u ostvarenju kakve druge tehnike električnog ili neelektričnog prijenosa energije.

U tom pogledu, perspektivna bi mogla biti otkrića supravodljivih keramičkih materijala ostvarena osamdesetih godina prošlog stoljeća (Slika 27.1). Ti materijali nemaju električni otpor pri temperaturi u području iznad 100 kelvina (dakle, iznad oko –170 °C). Još šezdesetih godina prošlog stoljeća, ostvarenja metalnih supravodiča bila su pri temperaturama do



Slika 27.1. Temperatura prijelaza u supravodljivo stanje odnosno u tekuće stanje nekih tvari (K)

20 kelvina (ili oko –253 °C). Ako bi se uspjelo ostvariti supravodljive materijale na temperaturi bliskoj temperaturi okoline (dakle barem oko 280–290 kelvina, odnosno 10–20 °C), omogućio bi se ekonomičan prijenos. Supravodič treba trajno držati na svojevrsnoj niskoj temperaturi, što predstavlja investicijski izdatak za rješenje kvalitetne toplinske izolacije (danas je to vakuum oko vodiča) i pogonski-energetski izdatak za održavanje toplinskog izolacijskog nivoa (pogon vakuumskih pumpi) i cirkulaciju rashladnog sredstva duž vodiča. Dopunska složenost sustava izlazi iz potrebe da se ne prekorači kritična gustoća struje i magnetska indukcija pri kojima nestaje svojstvo supravodljivosti. Ako se to prihvatljivo ostvari, prijenos električne energije okretao bi se prema velikim strujama (u području više stotina kiloampera) uz relativno niže napone; namjesto današnjeg načina – relativno malih struja (u području do nekoliko kiloampera) uz vrlo visoke napone (do više od jednog megavolta).

Postavimo li bliži vremenski okvir razmatranju, kakvih desetak godina unaprijed, možemo sa sigurnošću pretpostaviti kako su globalna očekivanja prema prijenosu električne energije u porastu. Zašto?

Nema znakova o prestanku upornog rasta potrošnje električne energije, čak i uz stanovito prigušeniji rast potrošnje ukupne energije zbog povećanja efikasnosti korištenja energijom (isti proizvod ili neku istu korist ostvarujemo uz manji utrošak energije). A već smo pokazali da razmjena električne energije između zemalja-članica UCTE-a raste brže od proizvodnje električne energije u tim zemljama (razmjena se povećala 5,5 puta, a povećanje proizvodnje tri puta u posljednjih trideset godina). Nikakvog znaka da bi to moglo prestati nema, dapače, može se očekivati samo intenziviranje te razmjene, dakle time i prijenosa električne energije, sve brojnijim i raznovrsnijim tržišnim aranžmanima na *europskoj elektroenergetskoj tržnici.* Očekujemo, dakle, nešto prigušeniji rast proizvodnih kapaciteta jer će oni biti izloženi sve jačoj konkurenciji pa se neće *olako* graditi, normalan rast distribucije sukladan rastu potražnje i *intenzivniji rast ukupne prijenosne moći* u mreži radi udovoljavanja sve većim i većim potrebama. Uvođenje sve više nekonvencionalnih izvora u elektroenergetske sustave pojedinih zemalja, također će – kako je rečeno – utjecati na rast internog prijenosa električne energije. A to uvođenje je neminovno, radi susprezanja u emisiji štetnih plinova i provođenja Direktive EU-a o obnovljivim izvorima, praktički za manje od deset godina doći će do udvostručenja proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora u Europi.

Globalna očekivanja prema prijenosu električne energije, u bližem predstojećem razdoblju, su – dakle – u porastu. Kako će se ona ispuniti?

Predvidiva rješenja osnovne tehničke strukture prijenosne mreže

Dokad se ostane na maksimalnim prijenosnim zadaćama od oko 2000 MW prenesenih na oko 100 kilometara (ili tome odgovarajućim kombinacijama *snaga puta duljina*), dotad će napon 400 kV biti ekonomičan. U europskim relacijama, granica bi se mogla dosegnuti ubrzanije zbog tržišnog poticanja na veći transport električne energije unutar Europske Unije i, osobito, zbog eventualnog naglijeg otvaranja interkonekcije UCTE prema Rusiji. *Uzdužna geografija* Italije može ubrzanije dovesti do toga, a u Švedskoj još i potpuni geografski nesklad između proizvodnih i potrošačkih područja. Odgovor nije lak: prijelaz na izmjenični prijenos pri naponu 700–800 kV ili odmah uz 1100–1200 kV ili – uz još malo strpljenja – na

istosmjerni prijenos, jer se granica njegove ekonomične primjene neprekidno snižava zbog pojeftinjenja komponenata.

Osnovna izolacija vanjskih rasklopnih postrojenja i nadzemnih dalekovoda ostaje, dakako, okolni zrak. No, on mora biti pomognut krutim izolatorima za nošenje vodiča, osiguravajući njihov siguran međusobni razmak i razmak prema zemlji. Tu je naglašeno kretanje prema nekeramičkim rješenjima (umjesto porculana i stakla); primjeni sintetskih materijala visokih mehaničkih svojstava i otpornosti prema utjecajima okoline. Od silikonskih premaza konvencionalnih izolatora, došlo se do proizvodnje silikonskih materijala za izradu izolatora odnosno njihovih vanjskih površina.

Izolacija unutrašnjih rasklopnih postrojenja, kao i unutrašnjosti komponenata rasklopnih postrojenja općenito (mjernih transformatora, donekle i energetskih transformatora), uglavnom se orijentira na sumporov heksafluorid (SF_6) zbog njegove visoke električne čvrstoće u odnosu na zrak i njegove inertnosti, nezapaljivosti i manje agresije prema okolini u odnosu na ulje. Ide se sve više na modularnu (moduli se potpuno izrade i ispitaju u tvornici, a na terenu se potom samo vrlo učinkovito slože u potrebnu cjelinu, poput *lego-kockica*), kompaktnu izvedbu polja i postrojenja, kako za unutrašnji tako i za vanjski smještaj. Unutrašnje postrojenje u oklopljenoj SF_6-izvedbi izvedeno je već za napon 800 kV, a izvlačivi prekidač izrađuje se već i za napon 550 kV.

S rješavanjem izolacije neposredno je povezano rješenje ograničenja prenapona u mrežama (jer izolacija mora biti sigurna prema njima, a ne prema najvišem pogonskom naponu). To se postiže povoljnim svojstvima prekidača, jer se unutarnji prenaponi javljaju kod sklapanja u mreži, i sve povoljnijim svojstvima *odvodnika prenapona*[204], jer oni sprečavaju prodor nastalih prenapona (unutarnjih ili zbog atmosferskih električnih pražnjenja) u najosjetljivije dijelove postrojenja – prvenstveno transformatore.

Sve šira primjena sumporova heksafluorida razumljiv je razlog da i za prekidače visokog i najvišeg napona sumporov heksafluorid postaje pretežno sredstvo za gašenje električnog luka. Nestaje potreba za proizvodnjom komprimiranog zraka ili manipuliranjem uljem. Takvi prekidači ostvaruju revizijske cikluse od 20 godina ako nisu izloženi izrazito brojnim manipulacijama u punim kratkospojnim uvjetima. Na srednjem naponu, pretežu vakuumska rješenja prekidača koja uopće ne poznaju reviziju rasklopne komore, osim njezine potpune zamjene nakon što se (veoma sporo) istroši.

Koliko god bi se pomišljalo da kod konvencionalnih vodiča praktički nema rezerve za razvojne pomake, ipak se i tu ne miruje. Osnovni materijal vodiča nadzemnih dalekovoda je aluminij (naglašeno manje specifične mase od bakra, niže cijene, povoljne strujne opteretljivosti i električnog otpora). Međutim, njegovo pažljivo legiranje i površinski premaz povećavaju trajno dopuštenu temperaturu kao i odvođenje topline, čime se omogućuje veće dopušteno strujno opterećenje određenog presjeka vodiča. Osobito zanimljivo pri rekonstrukcijama postojećih vodova i postrojenja – povećanje prijenosne moći bez povećanja opterećenja okoline. Dakako: povećana dopuštena temperatura znači odgovarajuće povećanje provjesa vodiča, pa se mora o tome voditi računa.

U velikim gradovima i uopće gusto naseljenim svjetskim područjima postaje nužno *uvlačenje* visokonaponskih rasklopnih postrojenja u urbanizirana područja, što dakako traži unutrašnji smještaj tih postrojenja u prikladnu zgradu i njihovu oklopljenu sumpor-heksafluoridnu izvedbu. No, i za priključak na visokonaponsku mrežu tih postrojenja ne

[204] surge arresters (engl.); danas su u primjeni jedino ZnO-odvodnici, cink-oksidni odvodnici prenapona.

mogu se primjeniti nadzemni dalekovodi, već se mora posegnuti za podzemnim kabelima. U najnovije doba ide se na cijevi, ispunjene sumporovim heksafluoridom, i u te cijevi ulažu se vodiči, pa tako dolazimo do podzemnih rješenja *plinom izoliranih vodova*[205], vrlo velike prijenosne moći, koja seže i do nekoliko tisuća megavata.

Aktivni dio energetskog transformatora sastoji se od magnetske jezgre, namota od bakrenih vodiča izoliranih papirom i uronjenih u izolacijsko ulje. U papirno-uljnim transformatorima najbolja iskoristivost prostora postiže se što manjim razmacima između dijelova namota pod naponom i jezgre odnosno kotla transformatora. Sigurnost prema proboju ostvaruje se što točnijim oblikovanjem papirnih zaslonam tako da, u vrlo složenim prostornim prilikama, na svakom mjestu prostora, njihove plohe budu upravo okomite na silnice električnog polja. Materijal za magnetske jezgre transformatora, proizvodi se sa sve većom orijentiranošću svoje unutrašnje magnetske strukture i vâlja u sve tanje limove, danas debljine oko 0,2 milimetra. Reže se laserskim zahvatom radi čuvanja strukture na rubovima. To vodi daljnjem smanjenju gubitaka transformatora, a jezgre iz takvih limova proizvode i manju buku pri radu transformatora.

Predvidiva nadgradnja osnovne strukture prijenosne mreže

Nadgradnja osnovne strukture prijenosne mreže (zaštita od nepoželjnih ili opasnih stanja, mjerenje, dojavljivanje i alarmiranje, reguliranje, sklapanje) oslanja se danas na numerička mikroprocesorska rješenja čije je sklopovlje (*hardver*) sve manjih dimenzija i otporno na elektromagnetske i sve druge utjecaje, a programska podrška (*softver*) sve kompleksnijih i fleksibilnijih svojstava. Temeljni uređaj postaje posve integriran sklop, povezan s primarnim postrojenjem i samostalno funkcionalan na razini polja rasklopnog postrojenja. Prema susjednim poljima, prema drugim postrojenjima u mreži i prema centru daljinskog vođenja povezan radi zahtjeva funkcioniranja sustava, ali spreman za elementarne funkcije i u slučaju njihova izostanka iz bilo kojeg razloga.

Kao sredstvo za ostvarivanje komunikacije, kako na velikim udaljenostima – tako i za interne međuveze na razini jednog postrojenja, sve je češće u primjeni svjetlovod, umjesto električnih žičnih povezivanja. Žično povezivanje se beskrajno multiplicira u složenijim sustavima. Svjetlovod je galvanski nevodljiv, golemog kapaciteta koji se ostvaruje uređajima na krajevima svjetlovoda (u kojima se električni signali moduliraju u svjetlosne). Svjetlovod je neizložen elektromagnetskim utjecajima (u tom pogledu) agresivne okoline – električnih visokonaponskih postrojenja, ne stvara probleme s iznošenjem opasnog električnog potencijala iz postrojenja, niti s neželjenim vođenjem struje kvara kada mu se krajevi nađu na različitim potencijalima. Praktična izvedba, prikladna za ionako nužna telekomunikacijska povezivanja duž trasa kojima idu visokonaponski vodovi, jest rješenje zaštitnog vodiča dalekovoda koji ima plašt od aluminijske legure ili čeličnih žica prevučenih tom legurom, a jezgra mu je svjetlovod.

Dinamička programska podrška u centrima upravljanja mrežom omogućuje upravljanje količinom i kvalitetom električne energije i promptni odgovor na (iznenadne) dinamičke promjene u mreži. Računalo, priključeno neposredno na informacije iz elektroenergetskog sustava (*on-line*), utvrđuje trenutnu pogonsku sigurnost i pravodobno sugerira dispečerske

[205] GIL = Gas Insulated Line

zahvate, tako da npr. mreža pouzdano ostane u pogonu ako u predstojećem razumnom vremenu dođe do ispada jednog voda, transformatora ili jednog generatora iz pogona[206]. U drugoj primjeni, odvojeno od elektroenergetskog sustava (*off-line*), takva programska podrška omogućuje – pored čitavog niza zamislivih analiza iz prošlosti i za budućnost – i trening operativnog osoblja dispečerskih centara[207] zadavanjem raznih ali mogućih pogonskih prilika u mreži i testiranjem njihovih reakcija.

Danas je moguć i daljinski pregled parametara ugađanja, praćenjem pojedinih regulabilnih elemenata u mreži kao i njihovo novo ugađanje, dakle faktični uvid u dislociranu inteligenciju sustava i njezinu daljinsku korekciju. Praktički, uspostavljaju se dvije linije daljinske komunikacije s objektom: linija sada već konvencionalnog vođenja (primarnog) procesa, koja završava u centru vođenja mreže, i linija koja služi daljinskom nadzoru zaštitnih uređaja te daljinskom milisekundnom/mikrosekundnom očitavanju vrijednosti struja i napona neposredno prije i nakon poremećaja i reagiranja ugrađenih sustava na poremećaj[208], a koja završava u službi za nadzor i održavanje zaštite.

Napredovanje u području održavanja ostvaruje se sve širim uvođenjem sofisticiranog pogonskog nadzora[209] stanja pojedinih ključnih komponenata rasklopnih postrojenja, radi pravodobnog utvrđivanja prijetećeg odstupanja tog stanja od normalnog i time pravodobne intervencije, kako bi se ostvario još bolji odnos preventiva/kurativa. Idealna težnja: posve anulirati prisilne zastoje pojedinih jedinica mreže – ostaviti samo planirane, unaprijed najavljene zastoje. Riječ je ovrlo obuhvatnom nadzoru transformatora i prekidača, kao najskupljim i najkompliciranijim komponentama, ali i drugih komponenata (npr. kabela), koji se ostvaruje senzorima. Signali iz tih senzora vode u računalo gdje se analiziraju, rezultirajući preporukama pogonskom osoblju. Među brojnim primjerima, na taj se način provodi permanentna kromatografska analiza transformatorskog ulja ili kontrola struje motora za navijanje opruge motorno-opružnog pogona prekidača. Zamislivo je da će svaka specijalistička služba za održavanje imati *svoj* kanal za daljinsko komuniciranje s ključnim aparatima za održavanje u nadleštvu te službe. Govori se o kompleksnom sustavu *gospodarenja*[210] nadzemnim vodovima, kabelskim vodovima, transformatorima ili prekidačima... te o *upravljanju rizicima*[211] u odnosu na pojedine komponente prijenosne mreže ili prijenosnu mrežu u cjelini. U tom pogledu osobito se ističu aktivnosti brojnih međunarodnih radnih grupa studijskih odbora CIGRE-a, koje izvještavaju o brojnim svojim općim nalazima i preporukama.

Primjer suvremenog korištenja računalnom podrškom je izrada tzv. ekspert-sustava koji predstavlja bogat i razgranat skup iskustvenih rješenja određenih zadaća uz variranje parametara tih zadaća. Pri tome rješenja nisu utvrđivana računskim ili kakvim drugim općenitim i egzaktnim algoritmom, nego opisuju odluku većeg broja stručnjaka za određen problem, odluku kakvu bi oni donijeli u danim okolnostima prema svom znanju, iskustvu i intuiciji. To može biti zasnovano i na kumuliranom vlastitom pozitivnom ili negativnom iskustvu iz prošlosti. Za te svrhe u najnovije doba koristi se tehnika tzv. neuronskih mreža, programska podrška koja omogućuje *učenje* iz prošlih prilika i korištenje naučenim u novim prilikama.

---

[206] EMS = Energy Management System
[207] DTS = Dispatcher Training Simulation
[208] SMS = Substation Monitoring System
[209] In-Service Monitoring (engl.)
[210] management
[211] risk management

Dalji napredak u održavanju prijenosne mreže postiže se sve većim obuhvatom izvođenja zahvata bez isključenja postrojenja: radovima pod naponom. Čime se smanjuje godišnje trajanje zastoja dijelova prijenosne mreže i povećava tekuća raspoloživost mreže, ostvaruje pravodobnost zahvata, smanjuju gubici u mreži, izbjegava angažman neekonomičnijih elektrana i preljev iskoristive vode hidroelektrana. U konačnici: prigušuje se potrebna dogradnja prijenosne mreže, stoga što neki vodovi pri takvom načinu održavanja ne trebaju imati svoju paralelnu rezervu. Ostvaruju se gotovo nevjerojatni pothvati: do zamjene čitavih komponenata rasklopnih postrojenja novima – bez prekida pogona ili popravka dalekovodnog vodiča u rasponu između dva stupa. Dakako, uporabom složene i skupocjene opreme, vrlo specijalizirana znanja i vještine radnika i temeljitih tehničkih i organizacijskih priprema.

Primjena energetske elektronike

Razvoj energetske elektronike velike snage (poluvodički tiristorski sklopovi 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[212].

Elementaran 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 izvede malo stepenica, a samo tako je novčano prihvatljivo, regulacija je previše gruba i mora se posezati za sinkronim rotacijskim kompenzatorom koji se može regulirati kontinuirano, ali je skup investicijski, te u pogonu i održavanju. Ne može se priključiti neposredno na visoki napon, nego na srednji napon – transformator za povezivanje novi je izvor jalovih gubitaka 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 (induktivnu reaktanciju) srazmjeran duljini voda. Ako se serijski u vodiče priključe kondenzatori, njihov kapacitivni otpor i induktivni otopor voda se kompenziraju. Ako je taj kapacitivni otpor regulabilan, može se utjecati na ukupnu reaktanciju 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 zamkastom 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 krat-

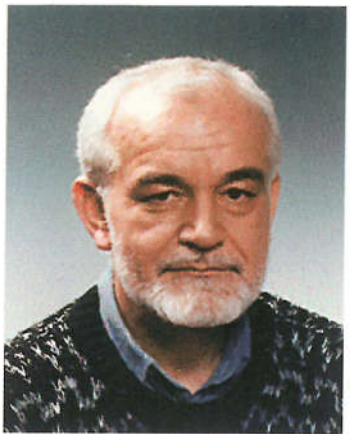
[212] To su tzv. FACTS-primjene (Flexible Alternating Current Transmission System).

kotrajnog ili definitivnog ispada pojedinog voda iz pogona. Međutim, ima manu da se u normalnim pogonskim prilikama mreže znaju uspostaviti tokovi snaga nepoželjni prema glavnim pravcima prijenosa; neki su vodovi jako opterećeni, a neki podopterećeni, pa su gubici u mreži veći no kada bi raspored bio ravnomjerniji. Ugradnjom regulacijskog poprečnog transformatora u prikladno izabranu granu mreže, može se utjecati na usmjeravanje tokova snaga u poželjnom smjeru.

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.

Istaknuta su recentna tehničko-tehnološka kretanja. U poslovnom smislu, poduzeća za prijenos električne energije sve više će se okretati prema takvom organiziranju i takvoj učinkovitosti da uz sve pažljiviju vanjsku kontrolu ukupnoga poslovanja (ponajprije prigodom, najčešće svakogodišnjeg, odobravanja regulirane naknade za korištenje mrežom) sa strane državnog regulatora uznastoje voditi pogon, održavati, razvijati i dograđivati svoju prijenosnu mrežu da bude što raspoloživija, što pouzdanija, prema tekućim i sutrašnjim zahtjevima.

Životopis autora



Marijan Kalea rođen je 1943. godine u Zagrebu, a od 1946. godine živi u Osijeku. Oženjen je i otac je dvoje djece. Zaposlen je u Hrvatskoj elektroprivredi od 1967. godine. Od škol. 1978./79. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku izvodi predavanja najprije iz predmeta Osnove elektrotehnike, kasnije iz Elektroenergetskih postrojenja, kao izabrani viši predavač uz rad.

Osnovnu i srednju elektrotehničku školu završio je u Osijeku. Diplomirao je 1966. godine na Elektrotehničkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, radom kod profesora Hrvoja Požara "Vrijednost gubitaka prijenosa i transformacije".

Stručno područje kojem je ponajviše bio okrenut na radnome mjestu bila su visokonaponska rasklopna postrojenja i dalekovodi, rješavajući – tijekom ukupnog dosadašnjeg radnog vijeka – praktično sva pitanja vezana uz njih. Od vođenja pogona i održavanja, do vođenja izgradnje i planiranja razvoja prijenosne mreže. Od 1974. do 1978. godine, vodio je odjel izgradnje mreže 400 kV u Slavoniji i Baranji, a od 1979. godine do 1992. godine bio je na radnom mjestu direktora Elektroprijenosa-Osijek. Danas je na radnom mjestu pomoćnika direktora Prijenosnog područja Osijek.

Mnogo je pisao i objavljivao, ponajviše stručno-publicističke radove. U stručnim časopisima i na savjetovanjima objavio je preko 60 stručnih članaka i stručnih radova, a u elektroprivrednim i drugim novinama preko dvije stotine stručno-publicističkih članaka, iz područja prijenosa električne energije, elektroenergetike te opće energetike. Obavio je stručne recenzije desetak knjiga raznih autora. Napisao je priručnik "Transformatorske stanice 35/10kV", što ga je izdala Elektroslavonija-Osijek. Na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku, napisao je skripta (u suradnji) Osnove elektrotehnike-laboratorijske vježbe, te skripta Uvod u osnove elektrotehnike.

Član je Izvršnog odbora Hrvatskog komiteta CIGRE i predsjednik njegova Studijskog komiteta za istosmjerni prijenos i energetsku elektroniku u mrežama izmjenične struje, član Uređivačkog odbora časopisa «Elektroenergetika», te član Izvršnog odbora Vijeća za energetiku Hrvatske akademije znanosti i umjetnosti. Dobitnik je nagrade «Hrvoje Požar» za 2002. godinu, za stručni i znanstveni doprinos razvitku energetike.

Literatura

1. H. Požar: Snaga i energija u elektroenergetskim sistemima. Prvi svezak, drugo izdanje. Informator-Zagreb, 1983.
2. H. Požar: Osnove energetike. Prvi svezak, drugo izdanje. Školska knjiga-Zagreb, 1992.
3. H. Požar: Izvori energije. SNL-Zagreb, 1980.
4. K. S. Deffeyes: Nakon nafte. Metropress-Zagreb, 2005.
5. M. i K. Ožegović: Električne energetske mreže. Svezak I. FESB-Split, 1996.
6. S. Despotović: Osnovi analize elektroenergetskih sistema. ZJE-Beograd, 1962.
7. B.Stefanini: Prijenos električne energije, skripta. ETF-Zagreb, 1963
8. B.Udovičić: Elektroenergetski sustav. Kigen-Zagreb, 2005.
9. H. Požar: Visokonaponska rasklopna postrojenja. Tehnička knjiga-Zagreb, 1990.
10. A. Dolenc: Transformatori, skripta. ETF-Zagreb, 1961.
11. B. Belin: Uvod u teoriju električnih sklopnih aparata. Školska knjiga-Zagreb, 1978.
12. ZEOH i Dalekovod: Tipizacija dalekovoda 110 kV u SR Hrvatskoj. Zagreb, 1986.
13. Nikola Tesla – Radovi iz oblasti elektroenergetike. Naučna knjiga-Beograd, 1988
14. T.Rausnitz: Grundlagen der elektrischen Energieversorgung. Hochschule, Bremen, 2003
15. B.Markovčić: Prijenos vrlo visokim trofaznim naponom. Institut za elektroprivredu, Zagreb, 1980.
16. B. Markovčić: Istosmjerni prijenos električne energije. Institut za elektroprivredu, Zagreb, 1980/81.
17. S. A. Sovalov: Upravlenie mošnjimi energo-objedinenijami. Energoatomizdat, Moskva, 1984.
18. Key World Energy Statistics 2005. IEA (www.iea.org)
19. Energija u Hrvatskoj 2003. Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva
20. F. Klemm: Geschichte der Technik. Deutsches Museum, München, 1983.
21. AEG-Hilfsbuch. Elitera-Verlag, Berlin, 1972.
22. Drehstromtechnik heute und morgen (povodom 100-god. prvog trofaznog prijenosa, 1891–1991). VDE-Verlag, Berlin-Offenbach, 1991.
23. Moderne Energie für eine neue Zeit. VDE-Verlag, Berlin-Offenbach, 1991.
24. 40 Jahre UCPTE. UCPTE-Sekretariat, 23. Mai 1991.
25. B. Markovčić i dr.: Razvoj elektrifikacije Hrvatske, 1.dio. Institut za elektroprivredu, Zagreb, 1984.
26. B. Markovčić i dr.: Razvoj elektrifikacije Hrvatske, 2.dio. Institut za elektroprivredu, Zagreb, 1987.
27. Stoljeće hrvatske elektroprivrede. HEP-Zagreb, 1995.
28. J. Moser: Šibensko munjivo. Gradska knjižnica 'Juraj Šižgorić', Šibenik, 1998.
29. Elektrifikacija grada Osijeka. Hrvatski štamparski zavod, podružnica Osijek, 1926.
30. S. Jurčić: Elektrika u Požegi. Historijski arhiv Slavonska Požega, 1963.
31. A history of the Bonneville Power Administration. BPA, 1976.

32. J. Moser: Pregled razvoja elektroprivredne djelatnosti u Hrvatskoj 1875–2000. Kigen-Zagreb, 2003.
33. 75 Jahre Reflexionen. NWK-Hamburg, 1975.
34. ...100 Jahre voller Spannung. Informationszentrale der Elektritizitätswirtschaft, Frankfurt am Main, 1992.
35. 100 Jahre Deutsche Stromversorgung. Elektritizitätswirtschaft 11-12/1992.
36. 380 kV mreža Jugoslavije. ZJE-Beograd, 1989.
37. F. Jakl: Trideset let sinhronega obratovanja z Evropo. Elektroslovenija-Ljubljana, 2004.
38. SUDEL 1964–1984
39. UCTE Memo 2004
40. NORDEL Key figures 2004
41. Live Line Work. Commonwealth Edison Company-Chicago, 1958.
42. I. G. Barg, S. V. Polevoj: Remont vozdušnjih linii elektroperedači pod naprjaženijem. Energoatomizdat, Moskva 1989.
43. A. V. Stukačev, L.V.Travin, R. N. Šuljga: Tehniko-ekonomičeskie problemi peredači električeskoj energii postojanjim tokom visokogo naprjaženija, Viniti, Moskva, 1984.
44. Z. Hebel i dr.: Oblikovanje statistike pogonskih događaja u prijenosnoj mreži Hrvatske elektroprivrede. Energija 4/1996, str. 173–186
45. M.Kalea: 25 godina prijenosa električne energije u Slavoniji i Baranji. Energija 5-6/1982, str. 181–192
46. M. Kalea: Povezivanje elektroenergetskih sistema postrojenjima istosmjerne struje. Energija 2/1989, str.135–143
47. M. Kalea, B. Markovčić, I. Deranja, Z. Plander, K. Ožegović: Pionirski pothvati javne elektrifikacije u Hrvatskoj. Energija 5-6/1995, str. 239–253
48. D. Feretić: Neki temeljni problemi proizvodnje električne energije u Hrvatskoj u kratkoročnom i srednjoročnom razdoblju. Energija 01/2006, str. 36–71
49. Strategija energetskog razvitka Republike Hrvatske. Narodne novine, 38/2002
50. Zakon o tržištu električne energije. Narodne novine, 177/2004

Izvori fotografija

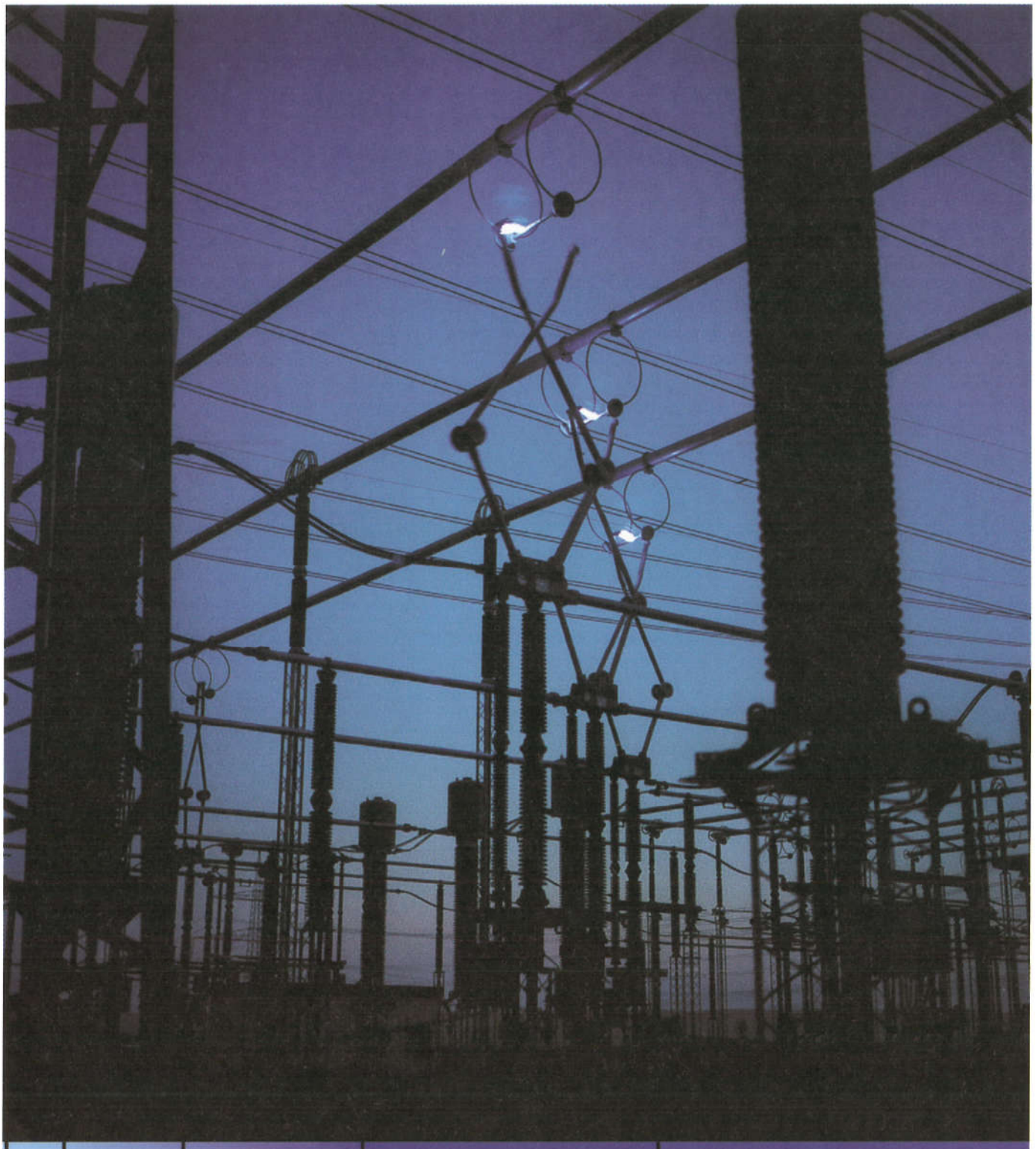
ABB
EDF
Electra CIGRE
Elektrizitätswirtschaft
Enel
HEP-OPS, Prijenosno područje Osijek
Siemens
Toshiba
VEÖ-Journal
Wikipedia, the free encyclopedia

Stvaramo vaše danas.

Pozicija **Dalekovoda** kao najbolje graditeljske tvrtke u jugoistočnoj Europi, dokaz je univerzalne kvalitete tvrtke koja svoje proizvode predstavlja na međunarodnom tržištu i prodaje u više od 80 zemalja svijeta.
Brojna stručna priznanja i zadovoljstvo naših klijenata kvalitetom proizvoda i usluga, ali i poštivanjem rokova, nenadmašna su motivacija za svakodnevni predani rad, nove tržišne uspjehe te potvrđivanje naše poslovne vizije - vrijednost je u trajnosti.

DALEKOVOD

Put pozitivne energije



U današnje vrijeme kada populacija naglo raste, a prirodni izvori energije se značajno smanjuju, Siemens nastoji osigurati najbolju tehnologiju koja omogućava praktičnost, učinkovitost i uštedu.

SIEMENS

Global network of innovation

www.siemens.hr

Čista energija

HEP

tradicija.
tradition.

Foto: FOTO SPRING

znanje.
knowledge.

odgovornost.
responsibility.

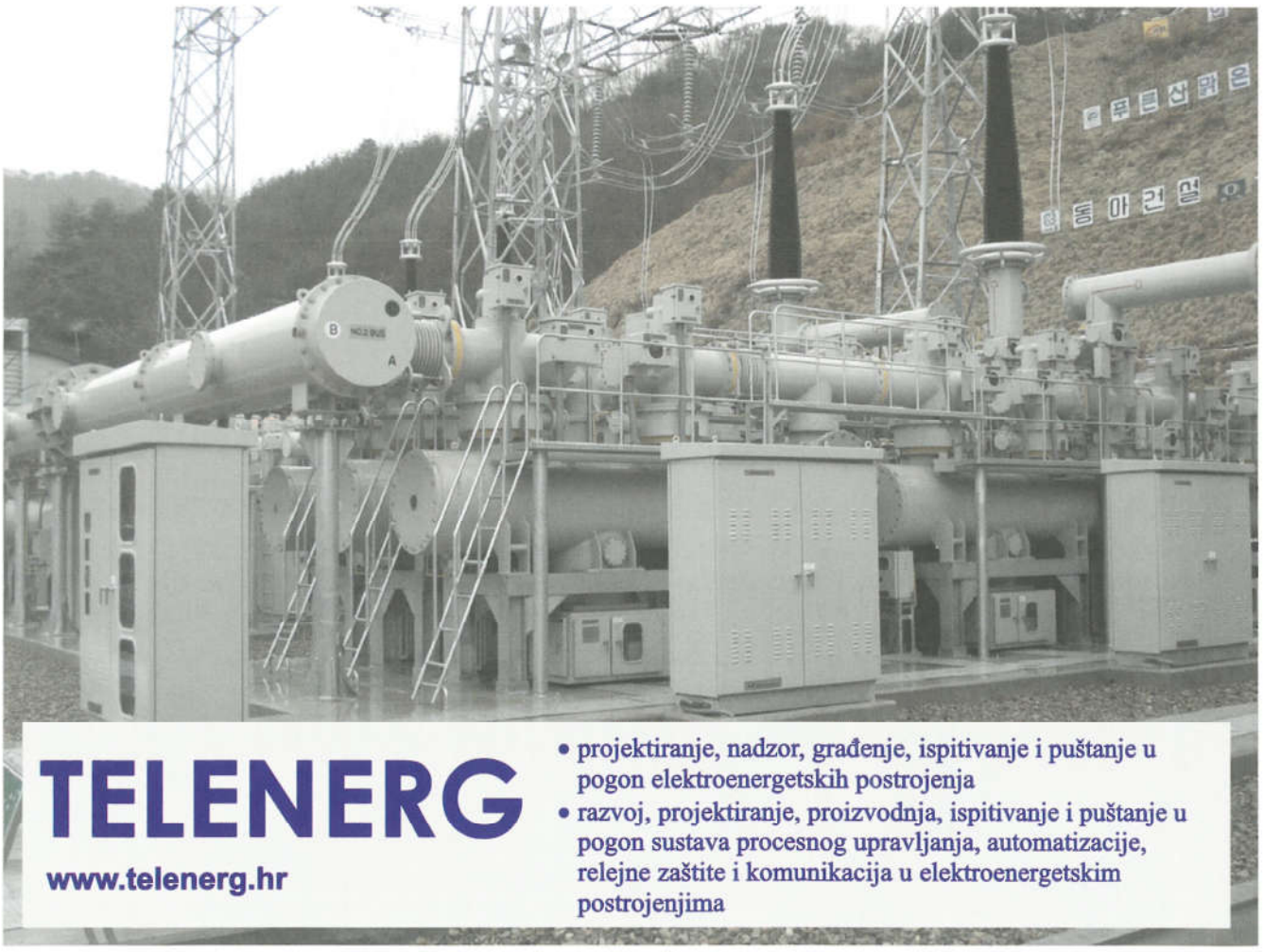
www.koncar.hr

KONČAR

ABB

Snaga i Produktivnost Za bolji svijet

ABB d.o.o.
Zavrtnica 17
HR 10000 Zagreb
Tel. 01 60 08 500
Fax. 01 61 95 111



TELENERG

www.telenerg.hr

- projektiranje, nadzor, građenje, ispitivanje i puštanje u pogon elektroenergetskih postrojenja
- razvoj, projektiranje, proizvodnja, ispitivanje i puštanje u pogon sustava procesnog upravljanja, automatizacije, relejne zaštite i komunikacija u elektroenergetskim postrojenjima

PROJEKTNI BIRO SPLIT d.o.o.

projektiranje i inženjering

21000 SPLIT, Ivana Gundulića 42
tel. 021/343 051, 405 555, fax.021/343 123
http://www.pbs.hr
e-mail: pbs@pbs.hr

Inženjeri PROJEKTNOG BIROA SPLIT d.o.o. imaju znanja i iskustva za izradu projektne dokumentacije za hidroenergetske objekte, transformatorske stanice svih naponskih razina, vodoopskrbne objekte i sustave, poslovno-stambene objekte, energetska postrojenja, procesne i telekomunikacijske sustave i to:

- Osnovna rješenja i koncepcije rješenja
- Tehničko-ekonomske analize
- Izrada programa istražnih i prethodnih radova
- Usmjeravanje i nadzor nad istražnim radovima
- Izrada idejnih rješenja
- Izrada idejnih projekata
- Izrada tenderske dokumentacije
- Razrada tehničkih rješenja za određenog ponuđača, prema tenderskoj dokumentaciji, radi izrade projekta
- Izrada glavnih projekata
- Izrada izvedbenih projekata
- Nadzor nad građenjem
- Izrada projekata izvedenog stanja
- Izrada uputstava za upravljanje i održavanje

HELB d.o.o.

Društvo za proizvodnju, montažu i servisiranje elektrouređaja
Slavka Kolara 4, 10370 Dugo Selo
tel: 01/ 2781 440 fax: 01/ 2781 445
www.helb.hr helb@helb.hr

ISO 9001:2000
Q - 205

ELEKTROENERGETSKA POSTROJENJA

Proizvodnja

Montaža

Ispitivanje

Puštanje u rad

elektroprojekt d.d.

Utemeljeno 1949.

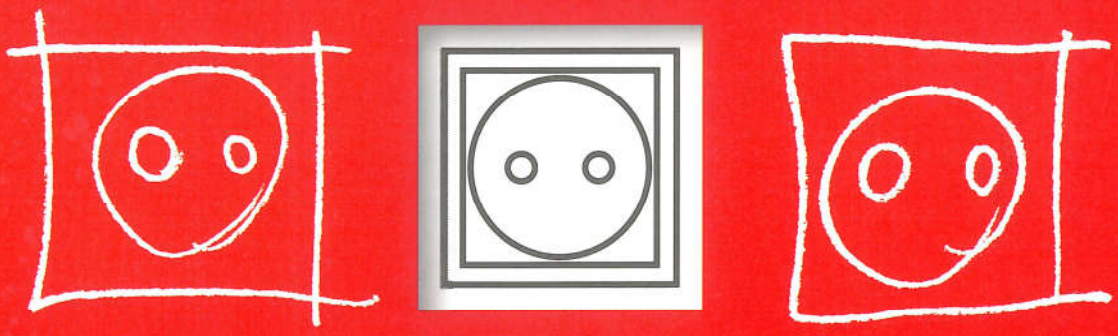
projektiranje, konzalting i inženjering

Stvaranje sklada graditeljstva i tehnologije
s čovjekom i prirodom
za sadašnju i buduće generacije

www.elektroprojekt.hr

Alexandera von Humboldta 4
p. p. 136
10000 Zagreb
telefon: 01 6307 777
telefaks: 01 6152 685

Projektiranje, konzalting i inženjering razvoja, izgradnje i upravljanja na područjima energetike, vodnog gospodarstva, zaštite prirode, komunalne infrastrukture, javnih objekata i telekomunikacija



... plug in ...

Kigen

Na početku moram reći, da sam bio sumnjičav prema tehničkoj knjizi, koja ne sadrži formule i matematičke izraze, a opisuje značajno područje rada elektroenergetskog sustava. Već nakon pročitanog prvog poglavlja Svijet energije shvatio sam da će čitanje knjige biti zadovoljstvo. I to se potvrdilo. Svih 27 poglavlja pisano je razumljivim stilom, bez složenih i kompliciranih izraza i rečenica, te otvara horizont čitaocu na područje prijenosa električne energije od prvih početaka u ranim godinama prošlog stoljeća pa do danas.

(Iz recenzije prof. dr. sc. Zdravka Hebela)

Marijan Kalea je intrigantno objedinio, s jasne pozicije unutar jednih korica rasuta znanja, i dao vlastiti doprinos. Tek kada se pročita ova knjiga postaje razvidno koliko je teško definirati područje interesa, koje su i gdje su granice prijenosa električne energije što uzeti iz dostupne tiskane i nepregledne literature na internetu. Ona potpuno odgovara na (samo)postavljeno pitanje, i to na jedan gotovo dramaturški način: svojim akterima, njihovim odnosima, njihovom zrelošću. Ovo je stimulativna knjiga, koja nastavlja isprekidanu nit tematike prijenosa električne energije u našoj literaturi...

(Iz recenzije mr. sc. Zdenka Tonkovića)

Zainteresirani čitatelj može početno pročitati samo jedno od tridesetak poglavlja o problematici koja ga trenutno zanima. No to će ga sigurno potaknuti da pročita i sljedeće poglavlje, a nakon toga i prethodno. Za jednog prijenosaša, koji želi biti stalno u stručnoj formi, ali i za one koji nisu baš u potpunosti sigurni što je prijenos električne energije i čemu on služi u složenom elektroenergetskom sustavu, ova bi knjiga trebala biti nešto što se povremeno ali i stalno čita. I koja, kada je zadovoljena želja za osnovnim znanjem o prijenosu, upućuje na dalja izučavanja uže izabrane problematike.

(Iz recenzije Božidara Radmilovića, dipl. ing.)

Autor je knjigu namijenio širokom krugu čitatelja, kako stručnom tako i laičkom krugu. Napisao je knjigu koja nije sveučilišni udžbenik, a bit će korisna studentima, pa i profesorima elektroenergetike. Napisao je knjigu za energetičare kojima prijenos nije uža specijalnost, ali za njom će često posegnuti i oni kojima je to specijalnost. Konačno, bilo bi dobro kada bi ova knjiga došla u ruke mnogim ljudima, posebno novinarima i političarima, jer bi se tako bitno promijenila u javnosti često kriva slika o elektroenergetskoj mreži i objektima.

(Iz recenzije Josipa Mosera, dipl.ing.)

Kigen
www.kigen.hr
litera scripta manet
ISBN 953697023-6
9 789536 970230