

Ivan Flegar
ii.flegar@gmail.com

00-00

OSNOVNA ENERGETSKA SVOJSTVA STATIČKIH PRETVARAČA

Sažetak: Rastavom djelatne snage na frekvencijske članove i primjenom načela ravnoteže djelatnih snaga na frekvenciji pokazano je da se energetska mreža bilo kojeg statičkog pretvarača može promatrati kao transformator djelatne snage na frekvenciji. Polazeći od tih postavki neposredno proizlaze uvjeti opstojnosti procesa pretvorbe za sve vrste statičkih pretvarača. Uzimajući u obzir i opće načelo minimaliziranja gubitaka snage u energetskim mrežama, definiran je pojam pretvaračke komponente i opisana su pretvaračka svojstva svih konstitutivnih komponenata (periodički sklapanih sklopki i reaktivnih komponenata) energetskih mreža statičkih pretvarača. Sva energetska svojstva statičkih pretvarača izvedena su ne razmatrajući strukture energetskih mreža pojedinačnih statičkih pretvarača. Također, objašnjeno je zašto pretvaračka mreža (lančani spoj pojne mreže, energetske mreže statičkog pretvarača i trošila) mora biti dobro definirana mreža. Na primjeru istosmjernog pretvarača za povezivanje istosmjernog naponskog izvora s istosmjernim naponskim uvorom pokazano je da taj zahtjev određuje strukturu energetske mreže istosmjernog pretvarača.

Ključne riječi: djelatna snaga na frekvenciji, dobro definirana mreža, pretvaračka komponenta, pretvaračka mreža, statički pretvarač, uvjeti opstojnosti

Uvod

Električne energetske mreže grade se da bi se riješio neki elektrotehnički problem vezan uz prijenos električne energije od pojne mreže do trošila. Izravan priključak trošila na pojnu mrežu moguć je samo ako se električne karakteristike pojne mreže podudaraju s električkim karakteristikama trošila. Pri tome se među osnovne električne karakteristike pojmih mreža i trošila ubrajaju frekvencija, valni oblik i amplituda napona, broj faza i galvanska (ne)odvojenost.

Ako se električne karakteristike pojmih mreža i trošila ne podudaraju potrebno je između pojmih mreža i trošila ugraditi uređaje za promjenu zadanih električkih karakteristika pojmih mreža u željene električne karakteristike trošila uz uvjet da ta promjena bude ostvarena uz najmanji mogući gubitak snage ugrađenih uređaja. Ti se uređaji mogu sastojati od samo jedne električke naprave (komponente), primjerice, transformatora, no najčešće su ti uređaji električke energetske mreže sastavljene od većeg broja naprava i nazivaju se jednim imenom 'energetski pretvarači'. Proces promjene električkih karakteristika pojne mreže u električne karakteristike trošila naziva se 'proces pretvorbe'¹, a grana elektrotehnike koja se bavi izgradnjom tih uređaja te izučavanjem njihovog međudjelovanja s pojnim mrežama i trošilima 'pretvaračka tehnika'.

Među energetske pretvarače ubrajaju se transformatori, električki rotacijski strojevi i statički pretvarači. Osnove rada transformatora i električkih rotacijskih strojeva bitno su različite od osnova rada statičkih pretvarača te se oni ne proučavaju u okviru pretvaračke tehnike. Statički pretvarači su pasivne električke mreže u kojima se proces pretvorbe ostvaruje s pomoću periodički sklapanih sklopki i te se naprave uobičajeno nazivaju 'pretvaračke komponente'.

Izuzetno uspješan razvoj poluvodičkih komponenata u sklopnom načinu rada (poluvodičkih ventila), koje po svojim sklopnim svojstvima nadmašuju sve ostale vrste periodički sklapanih sklopki, učinio je da se danas svi statički

¹ Uočimo da se tako definiran proces pretvorbe bitno razlikuje od uobičajene definicije u fizici, gdje se pod procesom pretvorbe razumijeva svaki proces u kojem se energija održava u kvantitativnom smislu, a mijenja u kvalitativnom smislu, dakle, kad energija prelazi iz jednog oblika u drugi. Promjena električkih karakteristika pojmih mreža u električne karakteristike trošila to nije. Štoviše, svaka pretvorba energije u energetskim pretvaračima, primjerice, električne energije u toplinsku energiju je neželjena. Proizlazi da je naziv 'proces pretvorbe' neispravno usmjeren naziv kao i sâm naziv 'pretvarač'. No, ti su nazivi u elektrotehničkoj praksi općeprihvaćeni, pa su zadržani i u ovom tekstu.

pretvarači grade s pomoću poluvodičkih ventila. Ti se statički pretvarači nazivaju 'elektronički energetska pretvarači', a grana elektrotehnike koja se bavi tim statičkim pretvaračima 'energetska elektronika'. Nazivi pretvaračka tehnika i energetska elektronika smatraju se danas sinonimima.

Energetska elektronika je danas etabliровано područje elektrotehnike o kojem postoji veliki broj udžbenika. No, unatoč različitim sadržajima i različitim pristupima u svim se udžbenicima prešutno pretpostavlja da se s pomoću mreža s poluvodičkim ventilima mogu ostvariti svi željeni procesi pretvorbe. Ta se pretpostavka smatra očiglednom i samorazumljivom činjenicom i ima status postulata energetske elektronike.

Prema mišljenju autora to nije samorazumljiva činjenica, posebno ne za početnike u struci. Da bi se njima kao i onima zainteresiranim za to područje olakšalo uvođenje u svijet energetske elektronike trebalo bi tu činjenicu objasniti a ne postulirati. To je autor i učinio, a rezultate istraživanja objavio u radovima [1 – 4] te u udžbeniku [5]. Analizirajući rastave djelatnih snaga pasivnih komponenata energetskih mreža statičkih pretvarača na frekvencijske članove, u tim je radovima odgovoreno na neka od temeljnih pitanja energetske elektronike, kao što su: Što je pretvaračka komponenta? Pod kojim uvjetima opstojе pojedine vrste procesa pretvorbe? Što je zajedničko raznovrsnim procesima pretvorbe?

Članak je podijeljen u dva dijela. Prvi dio članka bavi se onim dijelom analize energetskih procesa koji vrijedi za sve električke mreže. Pri tome je temeljni pojam analize pojam djelatne snage pasivnog jednoprilaza na frekvenciji. Pokazano je da u svakoj električkoj mreži vrijedi načelo ravnoteže djelatnih snaga na frekvenciji kao i da se u nelinearnim pasivnim mrežama, kao što su to energetske mreže statičkih pretvarača, osim procesa pretvorbe električne energije u toplinsku energiju događa i transformacija djelatne snage na frekvenciji. U drugom dijelu članka opisana su energetska svojstva statičkih pretvarača koja proizlaze iz poimanja statičkih pretvarača kao transformatora djelatne snage na frekvenciji. Također, objašnjeno je zašto statički pretvarač mora u zajednici s pojnom mrežom i trošilom tvoriti dobro definiranu mrežu.

1. O pojmu djelatne snage u električkim mrežama

1.1 Trenutačna snaga i djelatna snaga fizičkog sustava

Za analizu energetske procesa u svim električkim mrežama u ustaljenom stanju ključan je pojam djelatne snage, čija ispravna primjena proizlazi iz razumijevanja značenja općenitijeg pojma snage fizičkog sustava. Pri tome se pod fizičkim sustavom smatra pojedinačni fizički objekt ili njih više odvojenih stvarnom ili zamišljenom zatvorenom plohom od ostatka fizičkog svijeta, tj. okoline. Definicija snage fizičkog sustava temelji se na metafori o energiji kao fluidu [6], tj. tvari koja struji, prema kojoj je snaga fizičkog sustava $P(t, t + \Delta t)$ na intervalu $(t, t + \Delta t)$ jednaka količini energije $\Delta \mathcal{E}$ koja u jedinici vremena Δt prostruji kroz zatvorenu plohu okomitu na smjer protjecanja u okolinu ili obratno²

$$P(t, t + \Delta t) = \frac{\mathcal{E}(t + \Delta t) - \mathcal{E}(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta \mathcal{E}}{\Delta t} \quad (1)$$

U tehnici i fizici količina tvari koja u jedinici vremena prostruji kroz plohu okomitu na smjer protjecanja naziva se 'tok tvari', tako da riječ 'snaga' valja shvatiti kao sinonim za sintagmu 'tok energije' ili preciznije za sintagmu 'jakost toka energije'³.

Snaga je fizikalna veličina pridružena nekom fizičkom sustavu te nema smisla govoriti o snazi ako se ne navede fizički sustav na koji se ona odnosi. Zbog toga se u analizi energetske procesa nužno pojavljuje sintagma 'snaga X-a', gdje je X analizirani fizički sustav, recimo, elektromotor, otpornik ili dio električne mreže. 'Snaga X-a' ustvari znači 'jakost toka energije na zatvorenoj plohi koja odvaja X od okoline', te je praktičnost upotrebe kraće sintagme očigledna.

Graničnim prijelazom, kad $\Delta t \rightarrow 0$, dobiva se iz (1) da je trenutačna snaga fizičkog sustava $p(t)$ jednaka brzini promjene funkcije energije $\mathcal{E}(t)$ u trenutku t

² U inženjerskoj praksi bitno je znati količinu energije prenesene u jedinici vremena u ili iz fizičkog sustava u okolinu jer taj podatak određuju dimenzije objekata fizičkog sustava. Zbog toga se u tehničkim znanostima analiza energetske procesa u fizičkim sustavima provodi u terminima snage.

³ U elektrotehnici, posebno u elektroenergetici, često se upotrebljavaju sintagme, kao što su "prenesena snaga, predana snaga, tok snage" i sl., da bi se naglasilo da je snaga fizičkog sustava fizikalna veličina kojom se kvantificira prolaz energije kroz granicu koja dijeli fizički sustav od okoline. Doslovno shvaćene, te su sintagme besmislene jer impliciraju da preko granice koja dijeli fizički sustav od okoline ne struji energija nego energija u jedinici vremena! No, te sintagme treba shvaćati kao metaforične iskaze u kojima se metafora o energiji kao fluidu proširuje i na snagu fizičkog sustava. Zbog toga su te sintagme komunikacijski svrsishodne, uvriježene u praksi, pa će se koristiti i u ovom tekstu.

$$p(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta \mathcal{E}}{\Delta t} \right) = \frac{d\mathcal{E}(t)}{dt}$$

Za analizu energetske međudjelovanja između fizičkog sustava i okoline u periodičkom ustaljenom stanju s periodom T koristi se srednja vrijednost trenutačne snage na periodu,

$$P = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} p(\tau) d\tau = \frac{1}{T} [\mathcal{E}(t+T) - \mathcal{E}(t)] \gtrless 0 \quad (2)$$

i naziva se djelatna snaga fizičkog sustava. Ako je $P > 0$, fizički sustav unutar periode T prima energiju iz okoline, tj. ponaša se kao trošilo (uvor energije), a ako je $P < 0$, fizički sustav unutar periode T predaje energiju okolini, tj. ponaša se kao izvor energije. Ako je $P = 0$, fizički sustav i okolina ili razmjenjuju unutar periode T jednaku količinu energije ili ju uopće ne razmjenjuju.

1.2 Djelatna snaga električke mreže

U elektrotehnici se pod fizičkim sustavom razumijeva električka mreža – skup fizičkih naprava (komponenata) međusobno povezanih vodičima – ili dio električke mreže ili samo jedna naprava električke mreže koja je za potrebe analize odvojena od okoline stvarnom ili zamišljenom zatvorenim plohom. Izraz za trenutačnu snagu električke mreže a time i za djelatnu snagu električke mreže ovisi o tome unutar kojeg se teorijskog sustava elektrotehnike promatra analizirana električka mreža.

U elektrotehnici postoje dva teorijska sustava: teorija elektromagnetskog polja i teorija električkih mreža. Teorija elektromagnetskog polja preuzeta je iz klasične fizike i omogućuje analizu i objašnjenje elektromagnetskih pojava u bilo kojoj električkoj mreži. Temelji se na skupu eksperimentalnih zakona elektriciteta i magnetizma (Faradayev zakon elektromagnetske indukcije, Amperéov zakon struje, Gaussovi zakoni za električno i magnetsko polje) i izrazu za elektromagnetsku silu. Varijable teorije elektromagnetskog polja su vektorske veličine jakosti električnog polja, električnog pomaka, magnetskog polja i magnetske indukcije te skalarna veličina gustoće naboja. U okviru tog teorijskog sustava proizlazi iz zakona o lokalnom očuvanju energije, eksperimentalnih zakona elektriciteta i magnetizma i izraza za elektromagnetsku silu da je za svaku električku mrežu ili njezin dio odvojen od okoline zatvorenim plohom površine S trenutačna snaga električke mreže jednaka [7]

$$p_{\text{el}}(t) = \frac{d\varepsilon_{\text{el}}(t)}{dt} = \oint\oint_S \mathbf{P}_v \cdot \mathbf{n} ds$$

Pri tome je

$$\mathbf{P}_v = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$$

tzv. Poyntingov vektor, definiran vektorskim produktom jakosti električnog polja $\mathbf{E}$ i jakosti magnetskog polja $\mathbf{H}$ na zatvorenoj plohi površine S koja obuhvaća promatrani fizički sustav, dok je $\mathbf{n}$ jedinični vektor okomit na diferencijal plohe ds . Djelatna snaga električke mreže u periodičkom ustaljenom stanju s periodom T jednaka je, prema (2)

$$P_{\text{el}} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} p_{\text{el}}(\tau) d\tau$$

Drugi teorijski sustav – teorija električkih mreža – poseban je slučaj teorije elektromagnetskog polja i daje pojmovni okvir za izgradnju matematičkih modela svih električkih mreža kod kojih se može zanemariti valni karakter elektromagnetskih pojava. Te se mreže uobičajeno nazivaju 'električno malene mreže'⁴. Teorija električkih mreža temelji se na Kirchhoffovim zakonima čije su varijable skalarne veličine napona i struja na prilazima⁵ modela naprava električke mreže, tzv. elemenata mreže, i zakonu o očuvanju energije. Važnost teorije električkih mreža proizlazi iz činjenice da se velika većina svih električkih

⁴ Električno malena mreža je svaka mreža za koju vrijedi da je $d_m \ll c/2\pi f_M$, gdje je d_m najmanji dijаметar zamišljene zatvorene sferne plohe koja obuhvaća mrežu, f_M je najviša frekvencija bitna za rad mreže, a c je brzina svjetlosti u zraku.

⁵ Neki osnovni pojmovi teorije električkih mreža:

Prilaz je par priključaka kojim se pristupa u neko omeđeno (zatvoreno) područje električke mreže ili kojim se povezuje električka mreža s okolinom sa svojstvom da je u svakom trenutku struja koja ulazi u jedan od priključaka jednaka struji koja izlazi iz drugog priključka. Prilaz je mjesto prijenosa električne energije iz preostalog dijela mreže u to omeđeno područje ili obratno kao i iz okoline u električku mrežu ili obratno. Dio električke mreže koji je sa dva priključka spojen s preostalim dijelom električke mreže kao i električka mreža koja je sa dva priključka spojena s okolinom naziva se 'jednoprilaz', a s više pari priključaka 'višeprilaz'.

Grana je jednoprilaz spojen između dva čvora električke mreže

Element mreže je model (teorijski objekt) kojim je predodčen jedan fizikalni proces u modeliranoj napravi. Dije se na **reaktivne** elemente mreže (induktiviteti, kapaciteti), kojima je predodčen proces uskladištenja magnetske energije odnosno elektrostatičke energije i **disipativne** elemente mreže (otpori), kojima je predodčena pretvorba električne energije u druge oblike energije kao i obratan proces.

mreža koje se koriste u praksi u analizi energetske procesa može s dovoljnom točnošću smatrati električno malenim mrežama. Među te mreže ubrajaju se i energetske mreže statičkih pretvarača. U nastavku teksta analizirat će se samo električno malene mreže.

1.3 Djelatna snaga jednoprilaza (grane)

U električno malenim mrežama vektor jakosti električnog polja $\mathbf{E}$ i vektor jakosti magnetskog polja $\mathbf{H}$ određeni na zatvorenoj plohi S , koja obuhvaća promatranu mrežu, međusobno su nezavisne veličine⁶. U tom slučaju Poyntingov vektor na zatvorenoj plohi S ima nenultu vrijednost samo na mjestima gdje kroz tu plohu prolaze vodiči s pomoću kojih je promatrana električno malena mreža povezana s okolinom [8].

Obuhvati li se zatvorenom plohom S samo područje u kojem se nalazi k -ti jednoprilaz (k -ta grana), dobiva se da je trenutačna snaga k -tog jednoprilaza električno malene mreže jednaka

$$p_k(t) = u_k(t) \cdot i_k(t)$$

gdje su $u_k(t)$ i $i_k(t)$ trenutačne vrijednosti napona i struje k -tog jednoprilaza. Djelatna snaga k -tog jednoprilaza dana je izrazom

$$P_k = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u_k(\tau) \cdot i_k(\tau) d\tau, \quad (3)$$

i jednaka je srednjoj vrijednosti jakosti toka električne energije koja u periodu T prođe k -tim parom priključaka kroz zatvorenu plohu koja dijeli k -ti jednoprilaz od preostalog dijela električne mreže.

1.4 Energetski procesi u pasivnom jednoprilazu

⁶ Vektori $\mathbf{E}$ i $\mathbf{H}$ međusobno su nezavisni ako se a) može zanemariti pomaćna struja kroz zatvorenu plohu S jer tada, prema Amperéovom zakonu struje, jakost magnetskog polja $\mathbf{H}$ na toj plohi ne ovisi o brzini promjene električnog polja $\partial\mathbf{E}/\partial t$ i b) ako se može zanemariti vremenski promjenljivo magnetsko polje na zatvorenoj plohi S jer tada, prema Faradayevom zakonu elektromagnetske indukcije, jakost električnog polja $\mathbf{E}$ na toj plohi ne ovisi o brzini promjene jakosti magnetskog polja $\partial\mathbf{H}/\partial t$. Oba su uvjeta zadovoljena u električno malenim mrežama.

Električne mreže sastavljene su od fizičkih objekata – komponenata (naprava) – međusobno spojenih vodičima u čvorovima, tvoreći između svaka dva čvora jednoprilaz (granu) i priključenih preko jednog ili više prilaza na izvor(e) električne energije. S energetske stajališta te su komponente pasivne, tj. ne mogu pretvarati neelektričnu energiju u električnu energiju. Pretpostavi li se dodatno da sve komponente električne mreže miruju, to na razini modela znači da se sve pasivne komponente električnih mreža mogu prikazati pasivnim elementima mreže, u kojima je moguća jedino pretvorba električne energije u toplinsku energiju.

U pasivne elemente mreže ubrajaju se linearni i nelinearni vremenski nepromjenljivi reaktivni elementi (induktiviteti, kapaciteti) i pasivni disipativni elementi (otpori). Pasivni vremenski nepromjenljivi reaktivni elementi mreže mjesta su uskladištenja elektrostatičke odnosno magnetske energije; ne sudjeluju u energetskim pretvorbama te je njihova djelatna snaga jednaka nuli. Djelatna snaga pasivnih disipativnih elemenata mreže nenegativne je vrijednosti te za djelatnu snagu k -tog pasivnog jednoprilaza vrijedi da je u općem slučaju

$$P_k \geq 0$$

Uobičajeno se smatra da je u pasivnom jednoprilazu moguć samo proces pretvorbe električne energije u toplinsku energiju. Ta je tvrdnja točna, ali jedino ako je jednoprilaz sastavljen od linearnih i vremenski nepromjenljivih elemenata mreže. No, ako je mreža nelinearna i/ili vremenski promjenljiva u njoj se u periodičkom ustaljenom stanju pojavljuju valni oblici napona i struja u čijim frekvencijskim spektrima postoje frekvencije koje ne postoje u frekvencijskom spektru napona izvora električne energije koji djeluju u tim mrežama. To znači da u općem slučaju mogu postojati i djelatne snage pasivnih jednoprilaza na tim frekvencijama i ti se jednoprilazi tada ne mogu interpretirati samo kao mjesta pretvorbe električne energije u toplinsku energiju. Za razumijevanje energetskih procesa u takvim mrežama temeljan je pojam djelatne snage pasivnog jednoprilaza (grane) na frekvenciji kao i načelo ravnoteže djelatnih snaga na frekvenciji.

1.5 Djelatna snaga pasivnog jednoprilaza (grane) na frekvenciji

Promatrajmo k -ti pasivni jednoprilaz (električno malene) nelinearne mreže u periodičkom ustaljenom stanju s periodom T . Napon i struja k -tog jednoprilaza mogu se prikazati Fourierovim redovima

$$u_k(t) = U_k(0) + \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{U}_k(nf) \cos(2\pi nft) + \hat{V}_k(nf) \sin(2\pi nft)] \quad (4a)$$

$$i_k(t) = I_k(0) + \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{I}_k(nf) \cos(2\pi nft) + \hat{J}_k(nf) \sin(2\pi nft)] \quad (4b)$$

pri čemu je perioda $T = 1/f$. Članovi rastava $U_k(0)$ i $I_k(0)$ su srednje vrijednosti napona i struje jednoprilaza, dok su $\hat{U}_k(nf)$ i $\hat{V}_k(nf)$ amplitude ortogonalnih komponenata napona k -tog jednoprilaza na frekvenciji nf , a $\hat{I}_k(nf)$ i $\hat{J}_k(nf)$ amplitude ortogonalnih komponenata struje k -tog jednoprilaza na frekvenciji nf .

Djelatna snaga k -tog (pasivnog) jednoprilaza je, prema (3), jednaka srednjoj vrijednosti trenutačne snage te se nakon uvrštenja izraza (4) u (3), dobiva da je

$$P_k = P_k(0) + \tilde{P}_k \geq 0 \quad (5)$$

pri čemu je djelatna snaga k -tog jednoprilaza rastavljena na dva osnovna člana. To su:

a) istosmjerna snaga odnosno djelatna snaga k -tog jednoprilaza na frekvenciji $f = 0$

$$P_k(0) = U_k(0) \cdot I_k(0) \quad (6)$$

b) izmjenična djelatna snaga koja je jednaka zbroju djelatnih snaga k -tog jednoprilaza na svim frekvencijama $nf \neq 0$

$$\tilde{P}_k = \sum_{n=1}^{\infty} P_k(nf) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2} [\hat{U}_k(nf) \hat{I}_k(nf) + \hat{V}_k(nf) \hat{J}_k(nf)] \quad (7)$$

gdje je sa $P_k(nf)$ označena djelatna snaga k -tog jednoprilaza na frekvenciji nf , $n = 1, 2, \dots$

Rastav djelatne snage pasivnog jednoprilaza na frekvencijske članove, prema izrazima (5 – 7), ukazuje na važnost pojma djelatne snage pasivnog jednoprilaza na frekvenciji⁷ za razumijevanje energetskih procesa u nelinearnim

⁷ Izuzev uskog kruga projektanata parametarskih pojačala, pojam djelatne snage pasivnog jednoprilaza na frekvenciji slabo je poznat u elektroinženjerskoj zajednici. U svijet elektrotehnike uveo ga je američki profesor Paul Penfield [9]. Rastav djelatne snage pasivnog jednoprilaza na istosmjernu i izmjeničnu djelatnu snagu, ali bez uvođenja pojma

mrežama. Naime, iz tih izraza ne proizlazi nikakvo ograničenje na predznake članova rastava. Zbog toga je moguće da se neki pasivni element mreže u k -toj grani ponaša na nekim frekvencijama kao izvor, tj. da mu je djelatna snaga na tim frekvencijama negativna, a da se na ostalim frekvencijama ponaša kao trošilo, tj. da mu je djelatna snaga na tim frekvencijama pozitivna.

To se ne može dogoditi jedino ako je promatrani pasivni element mreže linearan i vremenski nepromjenljiv. Tako za linearni vremenski nepromjenljivi otpor konstitutivne relacije $u = Ri$, $R > 0$, vrijedi da je

$$P_R = RI^2(0) + R \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2} [\hat{i}^2(nf) + \hat{i}^2(nf)] > 0$$

što znači da je svaki član rastava pozitivan i sudjeluje jedino u pretvorbi električne energije u toplinsku energiju. Za bilo koji linearni i vremenski nepromjenljivi reaktivni element mreže (induktivitet ili kapacitet), ne samo da je djelatna snaga tog elementa mreže jednaka nuli nego i djelatna snaga na svakoj frekvenciji nf ,

$$P_L(nf) = P_C(nf) = 0, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

1.6 Načela ravnoteže snaga u električno malenim mrežama

Teorija električkih mreža temelji se na tri osnovna zakona. To su: Kirchhoffov zakon napona, koji izriče da je algebarski zbroj napona grana duž bilo koje petlje u mreži jednak nuli, Kirchhoffov zakon struje, koji izriče da je algebarski zbroj struja grana u bilo kojem čvoru mreže jednak nuli, i zakon o očuvanju energije, iskazan u terminima snage kao načelo ravnoteže trenutačnih snaga, koji izriče da je uz pridružene referentne smjerove⁸ napona i struja grana algebarski zbroj trenutačnih snaga svih b grana mreže jednak nuli

djelatne snage na frekvenciji, prvi je upotrijebio njemački fizičar Heinrich Barkhausen u svojoj doktorskoj disertaciji [10].

⁸ Referentni smjerovi napona $u_k(t)$ i struje $i_k(t)$ k -te grane spojene između čvorova A i B su pridruženi, odnosno oba su pozitivna, ako se pretpostavi da je električni potencijal čvora A $v_A(t)$ veći od električnog potencijala čvora B $v_B(t)$ tj. da je $u_k(t) = v_A(t) - v_B(t) > 0$, kada struja k -te grane $i_k(t)$ teče od čvora A prema čvoru B.

$$\sum_{k=1}^b p_k(t) = \sum_{k=1}^b u_k(t) i_k(t) = 0 \quad (8)$$

Kirchhoffovi zakoni i zakon o očuvanju energije iskazan kao načelo ravnoteže trenutačnih snaga nisu međusobno nezavisni zakoni. Bilo koja kombinacija dvaju osnovnih zakona implicira treći zakon. Primjerice, ako je algebarski zbroj trenutačnih snaga u nekoj mreži jednak nuli za sve napone grana koji zadovoljavaju Kirchhoffov zakon napona, tada to znači i da sve struje grana u toj mreži zadovoljavaju Kirchhoffov zakon struje.

Da Kirchhoffovi zakoni impliciraju zakon o očuvanju energije poznato je elektrotehničkoj zajednici još od rada engleskog fizičara Olivera Heavisidea objavljenog 1883. godine [11]. Manje je poznato da je nizozemski inženjer Bernard Tellegen u svom radu objavljenom 1952. godine pokazao da zakon o očuvanju energije, ne vrijedi samo za trenutačne snage grana nego i za sve napone i struje grana koji zadovoljavaju Kirchhoffove zakone. Prema Tellegenu, uz načelo ravnoteže stvarnih snaga, izraz (8), vrijedi i načelo ravnoteže kvazisnaga, tj. da je zbroj svih b umnožaka napona grana i struja grana jednak nuli i ako se tvore umnošci napona grana uzetih u jednom trenutku sa strujama grana iste mreže uzetim u drugom trenutku kao i ako se promatraju dvije različite mreže istog grafa i tvore umnošci napona grana jedne mreže sa strujama grana druge mreže. Taj poopćeni oblik zakona o očuvanju energije danas se uobičajeno naziva Tellegenov teorem [11].

Kirchhoffovi zakoni imaju oblik linearne homogene algebarske jednadžbe. Zbog toga oni vrijede ne samo za trenutačne vrijednosti napona i struja grana nego i za sve linearne transformacije tih varijabli. Tellegenov teorem u najopćenitijem obliku izriče da za dvije mreže istog grafa sa b grana vrijedi da je

$$\sum_{k=1}^b [\Lambda_u u_{k,1}(t)] [\Lambda_i i_{k,2}(t')] = 0 \quad (9)$$

gdje je Λ_u linearni operator koji djeluje na sve napone grana $u_{k,1}(t)$ jedne mreže u trenutku t , a Λ_i linearni operator koji djeluje na sve struje grana $i_{k,2}(t')$ druge mreže u trenutku t' .

Tipični linearni operatori su množenje s konstantom, množenje sa zadanom vremenskom funkcijom $f(t)$, deriviranje i integriranje. Uzastopnom primjenom linearnih operatora dobiva se ponovno linearni operator. To znači da će, ograničimo li se na promatranje jedne mreže u istom trenutku $t = t'$, tj. ako se u izraz (9) uvrsti da je $u_{k,1}(t) = u_k(t)$ odnosno $i_{k,2}(t') = i_k(t)$ te uz $\Lambda_u =$

Λ_i , primjenom Tellegenovog teorema proizaći da vrijedi i načelo ravnoteže djelatnih snaga

$$\sum_{k=1}^b P_k = \sum_{k=1}^b \frac{1}{T} \int_0^T u_k(t) i_k(t) dt = 0 \quad (10)$$

Među linearne operatore pripada i određivanje sinusnih odnosno kosinusnih Fourierovih koeficijenata napona i struja grana. Zbog toga Tellegenov teorem vrijedi posebno za sinusne odnosno kosinusne koeficijente napona i struja grana

$$\sum_{k=1}^b \hat{U}_k(nf) \hat{I}_k(nf) = 0 \quad \sum_{k=1}^b \hat{V}_k(nf) \hat{J}_k(nf) = 0$$

Odatle, uzevši u obzir izraz (7), proizlazi i načelo ravnoteže djelatnih snaga na frekvenciji

$$\sum_{k=1}^b P_k(nf) = 0 \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

i za nastavak analize važan zaključak: Ako se neki element mreže u mreži ponaša kao izvor na frekvenciji nf , neki drugi element mreže ili elementi mreže u toj mreži moraju biti trošila na toj istoj frekvenciji.

1.7 Pasivni jednoprilaz kao transformator djelatne snage na frekvenciji

Promatrajmo električku mrežu koja se sastoji od b pasivnih jednoprilaza (grana) i u kojoj je j -ti jednoprilaz modeliran nelinearnim elementom mreže, dok su svi ostali jednoprilazi modelirani linearnim vremenski nepromjenljivim elementima mreže. Pretpostavimo da u mreži djeluje izvor električne energije modeliran idealnim naponskim izvorom frekvencije f_{iz} te da se mreža nalazi u periodičkom ustaljenom stanju.

Nelinearnost j -tog jednoprilaza uzrokuje da se u harmonijskom spektru napona i struja svih jednoprilaza u toj mreži pojavljuju i frekvencije različite od frekvencije izvora. Zbog toga se u svakom jednoprilazu te mreže mogu pojaviti djelatne snage na frekvencijama $f \neq f_{iz}$. Linearni vremenski nepromjenljivi elementi mreže ne mogu stvarati nove frekvencije, tj. frekvencije različite od frekvencije izvora, te se svi linearni jednoprilazi mreže, u skladu s načelom

ravnoteže djelatnih snaga na frekvenciji, izraz (11), ponašaju kao trošila djelatne snage na svim frekvencijama koje postoje u mreži. Vrijedi da je

$$P_k(f_{iz}) \geq 0, \quad P_k(f \neq f_{iz}) \geq 0, \quad k \neq j, \quad k = 1, 2, \dots, b$$

Nelinearni j -ti jednoprilaz se na svakoj frekvenciji različitoj od frekvencije izvora ponaša kao izvor djelatne snage

$$P_j(f \neq f_{iz}) < 0$$

a zbog pasivnosti kao trošilo djelatne snage na frekvenciji izvora

$$P_j(f_{iz}) > 0$$

tako da vrijedi relacija

$$P_j = P_j(f_{iz}) + P_j(f \neq f_{iz}) \geq 0$$

To znači da se u j -tom jednoprilazu osim pretvorbe električne energije u toplinsku energiju događa i transformacija⁹ djelatne snage na frekvenciji izvora u djelatnu snagu na svim frekvencijama različitim od frekvencije izvora.

Proizlazi važan zaključak da je svaki pasivni jednoprilaz, koji nije linearan i vremenski nepromjenljiv, transformator djelatne snage na frekvenciji. On preuzima iz električke mreže djelatnu snagu na frekvenciji izvora, $P(f_{iz}) > 0$, predaje dio te djelatne snage toj istoj mreži na frekvencijama različitim od frekvencije izvora, $P(f \neq f_{iz}) < 0$, a ostatak preuzete djelatne snage predstavlja gubitak djelatne snage, $P \geq 0$, tj. jednak je količini električne energije koja se u jedinici vremena u jednoprilazu pretvara u toplinsku energiju.

2. Statički pretvarač kao transformator djelatne snage na frekvenciji

2.1 Vrste statičkih pretvarača

⁹ U znanstvenoj i stručnoj literaturi vrlo se često riječi 'pretvorba', 'konverzija' i 'transformacija' smatraju sinonimima. U ovom se tekstu riječ 'transformacija' upotrebljava za opis procesa promjene frekvencije na kojoj se električna energija prenosi mrežom, a riječ 'pretvorba' za proces promjene oblika energije. Kao što je istaknuto u prvoj fusnoti, termini 'proces pretvorbe' i 'pretvarač' upotrebljavaju se u značenju uobičajenom u elektrotehničkoj praksi.

U analizi energetske procesa u električkim mrežama ograničit ćemo se na analizu električkih energetske mreže statičkih pretvarača – posrednika – spojenih između pojne mreže (izvora električne energije) i trošila sa svrhom da raspoložive (zadane) električke karakteristike pojne mreže promijene u željene (zahtijevane) električke karakteristike trošila. Kao što je u uvodu navedeno među osnovne karakteristike neke električke energetske mreže ili njezinog funkcionalnog dijela ubrajaju se frekvencija, valni oblik napona odnosno struje, broj faza i galvanska (ne)odvojenost. Valni oblik napona odnosno struje povezan je s frekvencijom, dok je broj faza povezan s ekonomičnošću prijenosa i distribucije električne energije te ekonomičnošću pretvorbe električne energije u druge prijelazne oblike energije. Zbog toga su sa stajališta procesa pretvorbe najvažnije električke karakteristike frekvencija i galvanska (ne)odvojenost.

Galvanska odvojenost pojmih mreža od trošila postiže se upotrebom transformatora. Transformatori pripadaju među energetske pretvarače jer skaliraju valne oblike napona i struje pri nepromijenjenoj frekvenciji, no, kao što je u uvodu istaknuto, ne proučavaju se u okviru pretvaračke tehnike.

Proizlazi da je, sa stajališta pretvaračke tehnike, frekvencija najvažnija električka karakteristika statičkih pretvarača. S obzirom na taj kriterij statički pretvarači dijele se na pretvarače frekvencije i pretvarače napona.

Pretvarači frekvencije povezuju sustave pojmih mreža sa sustavima trošila različitih frekvencija i dijele se na a) ispravljače – pretvarače izmjeničnog sustava pojne mreže frekvencije izvora u pojnoj mreži f_{iz} u istosmjerni sustav trošila – b) izmjenjivače – pretvarače istosmjernog sustava pojne mreže u izmjenični sustav trošila frekvencije f_{tr} – i c) izmjenične pretvarače frekvencije – pretvarače izmjeničnog sustava pojne mreže frekvencije f_{iz} u izmjenični sustav trošila frekvencije $f_{tr} \neq f_{iz}$.

Pretvarači napona povezuju sustave pojmih mreža i trošila jednakih frekvencija i dijele se na izmjenične pretvarače napona i istosmjerne pretvarače.

2.2 Pretpostavke analize

Za potrebe analize odabrat ćemo najjednostavnije matematičke modele pojmih mreža, statičkih pretvarača i trošila. Za model energetske mreže statičkog pretvarača koristit ćemo naziv 'pretvarač', a za mrežu koju tvore modeli pojne mreže, energetske mreže statičkog pretvarača i trošila naziv 'pretvaračka mreža'.

a) Pretvarač tvori sklop komponenata u kojima se odvija proces pretvorbe, tzv. pretvarački sklop i sklopovi za prilagodbu pretvaračkog sklopa pojnoj mreži i

trošilu (ulazni i izlazni filtri). Sve komponente pretvarača, osim transformatora, modeliraju se pasivnim jednoprilazima. Transformator se modelira kao pasivni višeprilaz.

b) Pojnu mrežu tvore komponente koje pretvaraju neelektričnu energiju u električnu energiju – izvori električne energije – i komponente koje omogućuju prijenos električne energije od izvora do mjesta priključka pretvarača. Izmjenična pojna mreža modelira se kao višeprilaz (M-fazna pojna mreža) sastavljen od M idealnih izmjeničnih monoharmonijskih nezavisnih naponskih izvora zadane frekvencije f_{iz} . Istosmjerna pojna mreža modelira se idealnim istosmjernim nezavisnim naponskim izvorom.

c) Trošilo tvore komponente koje pretvaraju električnu energiju u neelektričnu energiju. U trošilu se mogu nalaziti i aktivne komponente, tj. komponente koje omogućuju reverzibilni tok električne energije (motori, akumulatorske baterije). Trošilo se modelira kao višeprilaz (N-fazno trošilo) sastavljen od pasivnih i/ili aktivnih elemenata mreže¹⁰. Trošilo preuzima djelatnu snagu samo na željenoj frekvenciji – frekvenciji trošila f_{tr} ¹¹.

d) Pretvaračka mreža promatra se u periodičkom ustaljenom stanju, što znači da su zadana frekvencija izvora i željena frekvencija trošila sumjerljive [5].

2.3 Pojam pretvaračke komponente

Pretvaračka mreža je lančani spoj triju višeprilaza – izvora, pretvarača i trošila – te će u skladu s načelom ravnoteže djelatnih snaga (10), vrijediti da je

$$P_{iz} + P_{pr} + P_{tr} = 0 \quad (12)$$

gdje je $P_{iz} = P_{iz}(f_{iz}) < 0$ djelatna snaga izvora električne energije, $P_{pr} \geq 0$ je djelatna snaga pretvarača, tj. količina električne energije koja se u jedinici vremena pretvara u toplinsku energiju i uobičajeno se naziva 'gubitci snage pretvarača', dok je $P_{tr} = P_{tr}(f_{tr}) > 0$ djelatna snaga trošila.

Načelo ravnoteže djelatnih snaga vrijedi ne samo globalno za djelatne snage izvora, pretvarača i trošila nego i za djelatne snage na svakoj frekvenciji

¹⁰ Aktivni element (mreže) je model kojim je predložena pretvorba neelektrične energije u električnu energiju. U aktivne elemente ubrajaju se vremenski promjenljivi reaktivni elementi i aktivni disipativni elementi (nezavisni i zavisni naponski ili strujni izvori).

¹¹ Odabirom načina upravljanja pretvaračkim sklopom kao i ugradnjom prikladnih filtara između pretvaračkog sklopa i trošila mogu se na prihvatljivu mjeru smanjiti iznosi djelatnih snaga prenesenih u trošilo na frekvencijama različitim od frekvencije trošila.

koja postoji u pretvaračkoj mreži uključujući i frekvenciju $f = 0$, izraz (11). U pretvaračkoj mreži postoje dvije frekvencije f_{iz} i f_{tr} te vrijedi da je

$$P_{iz}(f_{iz}) + P_{pr}(f_{iz}) = 0 \quad (13a)$$

$$P_{pr}(f_{tr}) + P_{tr}(f_{tr}) = 0 \quad (13b)$$

što znači da svaki pretvarač djeluje kao trošilo na frekvenciji izvora jer je $P_{pr}(f_{iz}) > 0$, odnosno kao izvor na frekvenciji trošila jer je $P_{pr}(f_{tr}) < 0$. Iz jednadžbi (13) proizlazi da se načelo ravnoteže djelatnih snaga, izraz (12), može napisati u obliku

$$P_{pr} = P_{pr}(f_{iz}) + P_{pr}(f_{tr}) \geq 0$$

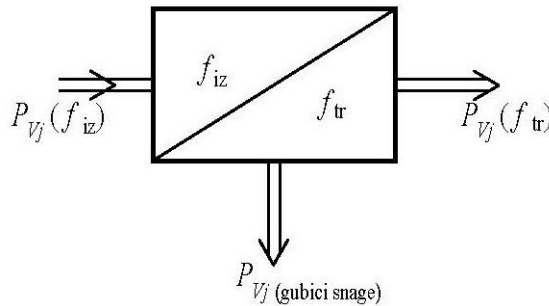
ili kao nejednadžba u obliku

$$P_{pr}(f_{iz}) > P_{pr} \geq 0 \quad (14)$$

Izraz (14) valja shvatiti kao uvjet opstojnosti bilo kojeg pretvarača. To znači da u svakom pretvaraču mora postojati skup komponenata $\{V_j\}$ za koji vrijedi da je

$$P_{V_j}(f_{iz}) > P_{V_j} \geq 0 \quad (15)$$

Svaka komponenta V_j za koju to vrijedi naziva se pretvaračka komponenta. Pretvaračka komponenta preuzima iz mreže djelatnu snagu na frekvenciji izvora i predaje toj istoj mreži djelatnu snagu na frekvenciji trošila, slika 1.



Sl. 1 Pretvaračka komponenta je transformator djelatne snage na frekvenciji

Razmatranje je, jednostavnosti radi, provedeno samo za dvije frekvencije u pretvaračkoj mreži. Proširenje razmatranja na više od dvije frekvencije je trivijalno ako se pod frekvencijom trošila shvati skup svih frekvencija na kojima se pretvarač ponaša kao izvor, odnosno ako se pod frekvencijom izvora shvati skup svih frekvencija na kojima se pretvarač ponaša kao trošilo.

2.4 Uvjet opstojnosti pojedinih vrsta procesa pretvorbe

Rastav djelatne snage pretvaračke komponente P_{V_j} na istosmjernu snagu $P_{V_j}(0)$ i izmjeničnu djelatnu snagu $\tilde{P}_{V_j}$ omogućuje nam da odredimo uvjete opstojnosti za sve vrste procesa pretvorbe.

Ispravljanje je proces transformacije izmjenične djelatne snage u istosmjernu snagu i ostvaren je ako ispravljač kao cjelina djeluje kao izvor istosmjerne snage. To znači da u bilo kojem ispravljaču zbroj istosmjernih snaga svih pretvaračkih komponenata mora biti negativan, tj. da je

$$\sum_{j=1}^k P_{V_j}(0) < 0 \quad (16)$$

gdje je k ukupni broj pretvaračkih komponenata ispravljača.

Izmjenjivanje je proces transformacije istosmjerne snage u izmjeničnu djelatnu snagu i ostvaren je ako izmjenjivač kao cjelina djeluje kao izvor izmjenične djelatne snage odnosno kao trošilo istosmjerne snage. To znači da u bilo kojem izmjenjivaču zbroj istosmjernih snaga svih pretvaračkih komponenata mora biti pozitivan, tj. da je

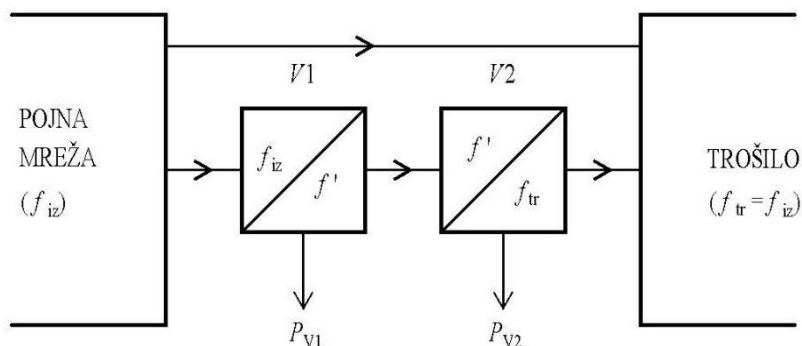
$$\sum_{j=1}^k P_{V_j}(0) > 0 \quad (17)$$

Izmjenična pretvorba frekvencija je proces transformacije izmjenične djelatne snage na jednoj frekvenciji u izmjeničnu djelatnu snagu na nekoj drugoj frekvenciji. Tijekom procesa pretvorbe ne smije se pojaviti istosmjerna snaga. Zbog toga u bilo kojem izmjeničnom pretvaraču frekvencije ukupna istosmjerna snaga svih pretvaračkih komponenata mora biti jednaka nuli, tj.

$$\sum_{j=1}^k P_{V_j}(0) = 0 \quad (18)$$

Istosmjerna i izmjenična pretvorba napona su procesi skaliranja integralnih veličina napona/struja trošila u odnosu na integralne veličine napona/struje pojne mreže. Za istosmjerna trošila to su srednje vrijednosti napona/struje, a za izmjenična trošila efektivne vrijednosti napona/struje. S obzirom na to da su pretvaračke komponente transformatori djelatne snage na

frekvenciji, jednakost frekvencije izvora i frekvencije trošila uvjetuje da u svakom pretvaraču napona moraju postojati minimalno dvije pretvaračke komponente suprotnih predznaka djelatne snage na frekvenciji izvora (trošila). Proces pretvorbe odvija se u dva koraka. U prvom se koraku dio djelatne snage ili, ovisno o strukturi pretvarača, sva djelatna snaga preuzeta na frekvenciji izvora f_{iz} transformira u djelatnu snagu na nekoj, načelno po volji odabranoj frekvenciji $f' \neq f_{iz}$. Kod izmjeničnih pretvarača napona ta frekvencija najčešće je jednaka nuli, dok je kod istosmjernih pretvarača napona najčešće jednaka frekvenciji sklapanja pretvaračkih komponenata (sklopnoj frekvenciji) f_s . U drugom se koraku tako transformirana djelatna snaga još jednom transformira, sada u djelatnu snagu na željenoj frekvenciji trošila $f_{tr} = f_{iz} \neq 0$ u izmjeničnim pretvaračima napona odnosno u istosmjernu snagu u istosmjernim pretvaračima napona, slika 2.¹²



Sl. 2 Tok djelatne snage u pretvaračima napona

Zaključujemo da su ispravljanje, izmjenjivanje i izmjenična pretvorba frekvencije temeljni procesi pretvorbe. Istosmjerna i izmjenična pretvorba napona to nisu jer se mogu ostvariti jedino kao kombinacija temeljnih procesa pretvorbe.

2.5 Konstitutivne komponente pretvarača

¹² Važan izuzetak je posebna vrsta izmjeničnih pretvarača napona, tzv. podešavači (engl. *ac regulators*) koji služe za upravljanje efektivnom vrijednošću struje izmjeničnih trošila. Za njihovu realizaciju dovoljna je jedna pretvaračka komponenta jer su sve frekvencije stvorene radom te pretvaračke komponente ujedno i željene frekvencije trošila.

Minimaliziranje gubitaka snage pretvarača P_{pr} bitan je zahtjev na svaki dobro projektirani pretvarač. To u praksi znači da u svakom pretvaraču moraju postojati pretvaračke komponente za koje vrijedi stroža varijanta uvjeta (15),

$$P_{V_j}(f_{iz}) \gg P_{V_j} \geq 0$$

a zahtjev za minimaliziranjem gubitaka snage proteže se i na sve ostale energetske komponente pretvarača. Zbog toga se u pretvaraču kao njegove konstitutivne komponente mogu upotrebljavati samo tzv. 'nazivno nedisipativne komponente'. Pri tome je nazivno nedisipativna svaka komponenta α za koju na razini najjednostavnijeg matematičkog modela vrijedi da je djelatna snaga jednaka nuli,

$$P_\alpha = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u_\alpha(\tau) \cdot i_\alpha(\tau) d\tau = 0$$

Taj uvjet zadovoljavaju vremenski nepromjenljive reaktivne komponente (kondenzatori i prigušnice), dok je za disipativne komponente to moguće jedino ako je trenutna snaga komponente u svakom trenutku t jednaka nuli, tj. da je

$$u_\alpha(t) \cdot i_\alpha(t) = 0 \quad (19)$$

Uvjet (19) zadovoljavaju jedino nelinearne disipativne komponente u sklopnom načinu rada (poluvodički ventili, elektromehaničke periodički sklapane sklopke i rotacijski kontakti).

To znači da se u pretvaraču kao konstitutivne komponente ne mogu koristiti sve ostale disipativne komponente, bilo da su linearne ili nelinearne, vremenski promjenljive ili vremenski nepromjenljive. Također, kao konstitutivne komponente pretvarača ne mogu se koristiti niti vremenski promjenljive reaktivne komponente. Te komponente, naime, nisu nazivno nedisipativne komponente jer fizikalni mehanizam kojim je ostvarena vremenska promjenljivost njihovog induktiviteta ili kapaciteta valja shvatiti kao izvor ili uvor djelatne snage [12]. Karakterističan primjer vremenski promjenljivih reaktivnih komponenata u elektroenergetici su rotacijski strojevi.

U najvećem broju primjena potrebno je da pretvaračke komponente budu upravljive, tj. da mogu mijenjati iznose transformirane djelatne snage pri nepromijenjenim parametrima pojne mreže i trošila. Da bi pri nepromijenjenim parametrima pojne mreže i trošila došlo do promjene integralnih veličina napona i struje trošila a time i do promjene iznosa transformirane djelatne snage prenesene trošilu, barem jedna pretvaračka komponenta u pretvaraču mora biti vremenski promjenljiva. Ta činjenica odmah eliminira reaktivne komponente kao

pretvaračke komponente u svim vrstama upravljivih pretvarača, što znači da su vremenski promjenljive disipativne komponente u sklopnom načinu rada jedine pretvaračke komponente upravljivih pretvarača.

Proizlazi da konstitutivne komponente pretvarača čine nelinearne vremenski nepromjenljive reaktivne komponente i/ili nelinearne vremenski nepromjenljive disipativne komponente u sklopnom načinu rada kao pretvaračke komponente neupravljivih pretvarača, odnosno nelinearne vremenski promjenljive disipativne komponente u sklopnom načinu rada kao pretvaračke komponente upravljivih pretvarača

3. Pretvaračka svojstva konstitutivnih komponenata pretvarača

3.1 Pretvaračka svojstva nelinearnih vremenski nepromjenljivih reaktivnih komponenata

Za reaktivne komponente pretvarača (prigušnice i kondenzatore), modelirane linearnim ili nelinearnim vremenski nepromjenljivim reaktivnim elementima mreže, induktivitetima i kapacitetima, djelatna snaga jednaka je nuli. U periodičkom stanju srednja vrijednost napona induktiviteta jednaka je nuli kao i srednja vrijednost struje kapaciteta, te je, prema izrazu (6), istosmjerna snaga svakog reaktivnog elementa mreže jednaka nuli. To znači da se nelinearne reaktivne komponente ne mogu upotrebljavati kao pretvaračke komponente u pretvaračima u kojima je tijekom procesa pretvorbe nužna nenulta istosmjerna snaga, kao što su ispravljači, izmjenjivači i istosmjerni pretvarači napona.

S obzirom na to da je djelatna snaga svakog (vremenski nepromjenljivog) reaktivnog elementa mreže jednaka nuli, proizlazi i da je izmjenična djelatna snaga svakog reaktivnog elementa mreže α jednaka nuli

$$\tilde{P}_\alpha = \sum_{n=1}^{\infty} P_\alpha(nf) = 0 \quad (20)$$

Ako je reaktivni element mreže nelinearan, svi članovi rastava izmjenične snage na frekvencijske članove – djelatne snage na frekvenciji nf – nisu jednaki nuli. To znači da, prema izrazu (20), zbroj pozitivnih djelatnih snaga na frekvenciji mora biti jednak zbroju negativnih djelatnih snaga na frekvenciji. Drugim riječima, nelinearne reaktivne komponente mogu se upotrijebiti kao pretvaračke komponente u izmjeničnim pretvaračima frekvencije. No, s pomoću njih nije moguće upravljati transformiranom djelatnom snagom, a frekvencija trošila ovisi

o obliku nelinearne karakteristike reaktivne komponente i višekratnik je frekvencije izvora električne energije u pojnoj mreži. Zbog tih se razloga nelinearne reaktivne komponente ne ubrajaju među pretvaračke komponente.

3.2 Pretvaračka svojstva nelinearnih disipativnih komponenata u sklopnom načinu rada

Disipativne komponente u sklopnom načinu rada gotovo su isključivo ostvarene s pomoću poluvodičkih ventila. Danas su sklopna svojstva poluvodičkih ventila takva da se energetske procesi u pretvaračkim mrežama mogu bez veće pogreške analizirati ako se poluvodički ventili modeliraju kao idealne periodički sklapane sklopke. Zbog toga će se u nastavku teksta pod pretvaračkom komponentom smatrati idealna periodički sklapana sklopka V , za koju prema (5) vrijedi da je

$$P_V(0) + \tilde{P}_V = 0$$

što znači da će se smatrati idealnim transformatorom djelatne snage na frekvenciji.

Iz $u - i$ karakteristike neke pretvaračke komponente može se lako odrediti predznak njezine istosmjerne snage kao i mogućnost da ta istosmjerna snaga bude jednaka nuli. To je koristeći se uvjetima opstojnosti pojedinih vrsta procesa pretvorbe, izrazi (16 – 18), dovoljno da se odredi u kojim se vrstama pretvarača može upotrijebiti promatrana pretvaračka komponenta.

Zbog toga je važno odrediti sve moguće $u - i$ karakteristike idealnih periodički sklapanih sklopki i tako odrediti sve moguće različite pretvaračke komponente. Pri tome treba uzeti u obzir da je svaka (idealna periodički sklapana) sklopka pasivna, nedisipativna i nelinearna komponenta. Zbog pasivnosti karakteristika svake sklopke nalazi se u prvom i trećem kvadrantu $u_V - i_V$ ravnine, što znači i da mora proći kroz njezino ishodište. Sklopka je nedisipativna, što znači da se svaki od odsječaka njezine karakteristike mora nalaziti ili na osi i_V ili na osi u_V da bi djelatna snaga sklopke u svakom trenutku bila jednaka nuli. Sklopka je nelinearna, što znači da se njezina karakteristika ne smije nalaziti samo na osi i_V niti samo na osi u_V .

Za daljnju analizu označimo odsječke $u - i$ karakteristike koji pripadaju stanju vođenja sklopke, tj. one odsječke koji se nalaze na osi i_V , na sljedeći način: vođenje u prvom kvadrantu ($i_V \geq 0$) sa I_V^+ , vođenje u trećem kvadrantu ($i_V \leq 0$) sa I_V^- a vođenje u prvom i trećem kvadrantu ($i_V \lessgtr 0$) sa $I_V^\pm$. Na analogan način označimo odsječke koji pripadaju stanju nevođenja, tj. one odsječke koji se

nalaze na osi u_V : nevođenje u prvom kvadrantu – blokiranje – ($u_V \geq 0$) sa U_V^+ , nevođenje u trećem kvadrantu – zapiranje – ($u_V \leq 0$) sa U_V^- , a nevođenje u prvom i trećem kvadrantu ($u_V \lesseqgtr 0$) sa $U_V^\pm$.

Svaka $u - i$ karakteristika unija je jednog odsječka na osi i_V i jednog odsječka na osi u_V . Lako se vidi da je moguće devet različitih kombinacija, no samo pet od njih su uistinu različite. To su četiri asimetrične kombinacije

$$I_V^+ \cup U_V^-, \quad I_V^+ \cup U_V^\pm, \quad I_V^\pm \cup U_V^+, \quad I_V^+ \cup U_V^+ \quad (21)$$

a jedna je simetrična

$$I_V^\pm \cup U_V^\pm$$

Preostale četiri kombinacije također su asimetrične

$$I_V^- \cup U_V^+, \quad I_V^- \cup U_V^\pm, \quad I_V^\pm \cup U_V^-, \quad I_V^- \cup U_V^-$$

pri čemu je zbog dvije jednakovrijedne mogućnosti pridjeljivanja pozitivnog odnosno negativnog predznaka referentnih smjerova napona i struja očigledno da su te karakteristike funkcionalno jednake prethodno navedenim četirima karakteristikama, danim izrazima (21).

Proizlazi da postoji samo pet različitih (idealnih periodički sklapanih) sklopki. To su neupravljiva sklopka, strujno jednosmjerna sklopka, naponski jednosmjerna sklopka i dvosmjerna sklopka¹³, čije su $u - i$ karakteristike prikazane na slici 3, te jednokvadrantna sklopka $u - i$ karakteristike prikazane na slici 4.

Sklopka karakteristike $I_V^+ \cup U_V^-$, prikazane na slici 3a, ima svojstvo da vodi nenegativnu struju ($i_V \geq 0$) i da blokira nepozitivni napon ($u_V \leq 0$). Sklopka ili vodi struju ili blokira napon ovisno o trenutačnom stanju na njezinim priključcima te je zbog toga neupravljiva. Iz $u - i$ karakteristike proizlazi da je u netrivialnim režimima rada¹⁴ srednja vrijednost napona neupravljive sklopke uvijek negativna, srednja vrijednost struje uvijek pozitivna, što znači da je istosmjerna snaga neupravljive sklopke negativna, a izmjenična djelatna snaga pozitivna, tj.

¹³ Realizacija svih vrsta sklopki s pomoću poluvodičkih ventila opisana je u svim udžbenicima energetske elektronike.

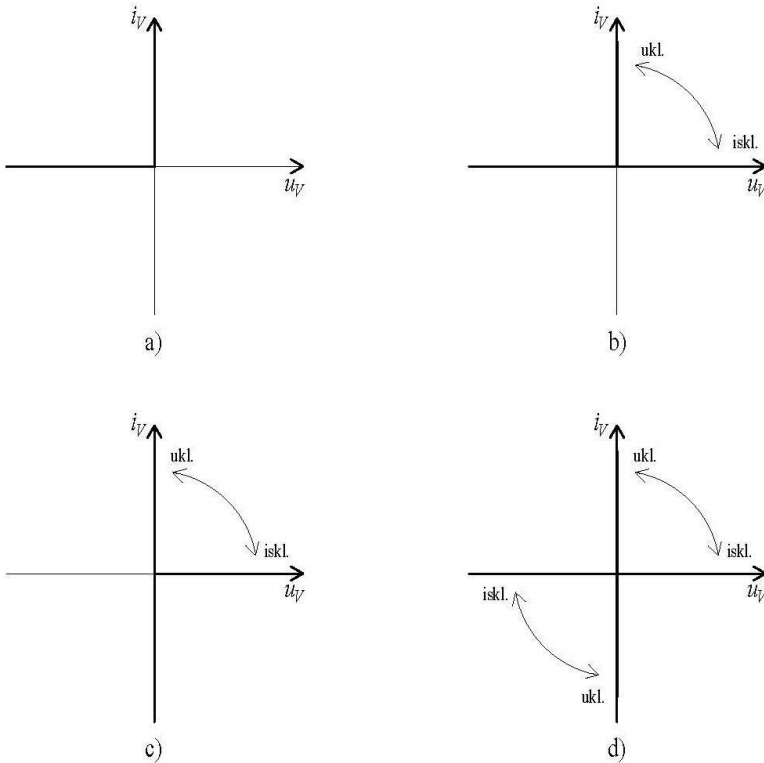
¹⁴ Trivijalne režime rada karakterizira ili trajno vođenje sklopke (kratki spoj grane u mreži) ili trajno nevođenje sklopke (prekid grane u mreži), što znači da u tim režimima rada ne postoji transformacija djelatne snage na frekvenciji.

$$P_V(0) < 0, \quad \tilde{P}_V > 0 \quad (22)$$

Proizlazi da je neupravljiva sklopka element mreže u kojem se izmjenična djelatna snaga preuzeta iz izmjenične mreže transformira u istosmjernu snagu. Obrat nije moguć. Ako u pretvaračkoj mreži postoje samo neupravljive sklopke, moguć je jedino ispravljački proces pretvorbe bez mogućnosti upravljanja iznosom transformirane djelatne snage trošila.

Analognim razmatranjima lako je zaključiti da su strujno jednosmjerna sklopka karakteristike $I_V^+ \cup U_V^\pm$, prikazane na slici 3b, i naponski jednosmjerna sklopka karakteristike $I_V^\pm \cup U_V^+$, prikazane na slici 3c, pretvaračke komponente za koje je u netrivialnim režimima rada predznak istosmjerne snage po volji

$$P_V(0) \leq 0, \quad \tilde{P}_V \geq 0 \quad (23)$$



Sl. 3 $U - i$ karakteristika a) neupravljive sklopke, b) strujno jednosmjerne sklopke, c) naponski jednosmjerne sklopke i d) dvosmjerne sklopke

To znači da se tim sklopkama istosmjerna snaga može transformirati u izmjeničnu djelatnu snagu i obratno, dakle, moguć je ispravljački i izmjenjivački

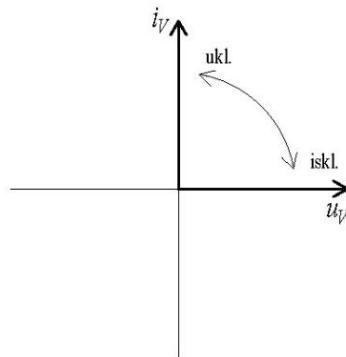
proces pretvorbe. U prvom kvadrantu $u_V - i_V$ ravnine strujno jednosmjerna sklopka i naponski jednosmjerna sklopka imaju dvije različite karakteristike, što znači da mogu biti ili uklopljene (vode pozitivnu struju) ili mogu biti isklopljene (blokiraju pozitivni napon). Zbog toga te sklopke osim dva energetska priključka imaju i treći priključak – upravljački priključak – kao i sklop koji djelujući na upravljački priključak, upravljačkim signalom, odlučuje o tome hoće li sklopka voditi pozitivnu struju ili blokirati pozitivni napon. Proizlazi da su te sklopke vremenski promjenljive komponente jer mogu uklopiti neovisno o vrijednosti pozitivnog napona između energetskih priključaka odnosno isklopiti neovisno o vrijednosti pozitivne struje kroz energetske priključke. Dakle, ne samo da mogu transformirati istosmjernu snagu u izmjeničnu djelatnu snagu i obratno, nego mogu i upravljati iznosom transformirane djelatne snage trošila.

S pomoću tih komponenata mogu se izgraditi upravljivi ispravljači i izmjenjivači. Također, mogu se izgraditi i istosmjerni i izmjenični pretvarači napona jer se njihov rad zasniva na kombinaciji ispravljačkog i izmjenjivačkog procesa pretvorbe.

Iz $u - i$ karakteristike dvosmjerne sklopke $I_V^\pm \cup U_V^\pm$, prikazane na slici 3d, vidljivo je da je dvosmjerna sklopka upravljiva pretvaračka komponenta, a za razliku od svih ostalih pretvaračkih komponenata, njezina je $u - i$ karakteristika simetrična (bilateralna). To znači da se izborom načina upravljanja u netrivialnim režimima rada može postići ne samo da je predznak istosmjerne snage dvosmjerne sklopke po volji nego i da istosmjerna snaga sklopke bude jednaka nuli

$$P_V(0) \leq 0, \quad \tilde{P}_V \geq 0 \quad (24)$$

Proizlazi da je dvosmjerna sklopka pretvaračka komponenta koja ne samo da može transformirati izmjeničnu djelatnu snagu u istosmjernu snagu i obratno, nego i izmjeničnu djelatnu snagu jedne frekvencije u izmjeničnu djelatnu snagu druge frekvencije, a da se tijekom procesa pretvorbe ne stvori neželjena istosmjerna snaga. To znači da se dvosmjerna sklopka može upotrijebiti u svim vrstama upravljivih pretvarača.



Sl. 4 $U - i$ karakteristika jednokvadrantne sklopke

Jednokvadrantna sklopka karakteristike $I_V^+ \cup U_V^+$, prikazane na slici 4, upravljiva je pretvaračka komponenta čija je istosmjerna snaga pozitivna te predstavlja transformator istosmjerne snage u izmjeničnu djelatnu snagu. No, $u - i$ karakteristika jednokvadrantne sklopke nije definirana u trećem kvadrantu. Trivijalna je činjenica da za svaki jednoprilaz postoje u stvarnom svijetu dva jednakovrijedna smjera napona prilaza odnosno struje prilaza. Zbog toga je nedefiniranje $u - i$ karakteristike u trećem kvadrantu fizikalno neispravno, a jednokvadrantna sklopka u stvarnom svijetu ne postoji niti može postojati.

Nepostojanje jednokvadrantne sklopke kao fizičkog entiteta ne predstavlja u praksi nikakvu poteškoću jer se njezino pretvaračko svojstvo transformatora istosmjerne snage u izmjeničnu djelatnu snagu jednostavno realizira s pomoću strujno jednosmjerne sklopke ili naponski jednosmjerne sklopke. Zbog toga nije potrebno ni u teorijskim razmatranjima među pretvaračke komponente ubrojiti jednokvadrantnu sklopku, čime se broj međusobno različitih pretvaračkih komponenata svodi na četiri komponente $u - i$ karakteristika prikazanih na slici 3.

4. Struktura statičkih pretvarača

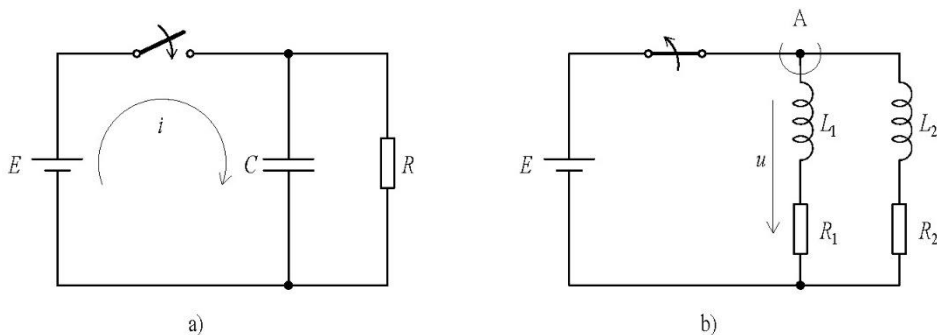
4.1 Pretvaračka mreža kao dobro definirana mreža

Struktura pretvarača kao i način spoja pretvarača s izvorom i trošilom mora biti takav da se pretvaračka mreža može modelirati dobro definiranom mrežom. Pri tome se pod dobro definiranom mrežom smatra svaka mreža u kojoj

se promjenom stanja sklopke ne mogu na razini najjednostavnijeg modela komponenata mreže stvoriti niti kapacitivne petlje niti induktivni čvorovi. U protivnom mreža je loše definirana [13].

Kapacitivna petlja je petlja koju tvore samo kapaciteti i/ili nezavisni naponski izvori/uvori u kojoj je u trenutku uklopa sklopke prekršen Kirchhoffov zakon napona. Tako je u električkom krugu prikazanom na slici 5a u trenutku uklopa sklopke stvorena kapacitivna petlja ako se napon kapaciteta C neposredno prije uklopa sklopke razlikuje od napona izvora E . Struja kapacitivne petlje neposredno nakon uklopa sklopke je beskonačna jer je došlo do trenutačne promjene elektrostatičke energije u kapacitetu C . U stvarnosti struja petlje bit će ograničena parazitnim parametrima petlje, kao što su otpornost naponskog izvora i spojnih vodiča, serijska otpornost kondenzatora, neidealnost sklopke i induktivnost ožičenja.

Induktivni čvor je čvor na koji su spojeni samo induktiviteti i/ili nezavisni strujni izvori/uvori u kojem je u trenutku isklopa sklopke prekršen Kirchhoffov zakon struje. Tako je u električkom krugu prikazanom na slici 5b u trenutku isklopa sklopke stvoren induktivni čvor A. Napon induktivnog čvora neposredno nakon isklopa sklopke je beskonačan jer je došlo do trenutačne preraspodjele magnetske energije između induktiviteta L_1 i L_2 . U stvarnosti napon induktivnog čvora bit će ograničen jedino parazitnim parametrima komponenata spojenih na čvor, kao što su neidealnost sklopke i kapacitivnosti prigušnica.



Sl. 5 Dva jednostavna “školska” primjera loše definirane mreže

U potpoglavlju 1.6 istaknuto je da važenje Kirchhoffovih zakona implicira važenje zakona o očuvanju energije. Ali nevaženje Kirchhoffovih zakona u trenutku sklapanja sklopki u loše definiranim mrežama ne implicira nevaženje zakona o očuvanju energije. Razlika između energije uskladištene u reaktivnim komponentama neposredno prije i neposredno poslije sklapanja sklopki pretvara se u loše definiranoj mreži u toplinsku energiju i/ili energiju

elektromagnetskog zračenja, što znači da se u takvoj mreži pojavljuju i dodatni gubici snage.

Već iz razmatranja ovih jednostavnih primjera postaje očigledno zašto svaka pretvaračka mreža mora biti dobro definirana. U loše definiranoj pretvaračkoj mreži stvaranjem kapacitivnih petlji i/ili induktivnih čvorova forsira se trenutna preraspodjela elektrostatičke i/ili magnetske energije u reaktivnim komponentama pretvarača. U stvarnosti brzina kojom se preraspodjeljuje uskladištena energija u reaktivnim komponentama pretvarača ovisi o parazitnim parametrima svih komponenata koje tvore kapacitivne petlje i/ili induktivne čvorove pretvaračke mreže. Ti parametri najčešće nisu pouzdano poznati ili čak nisu uopće deklarirani tako da preraspodjelu uskladištene energije prate nepredvidljiva naponska i strujna opterećenja komponenata pretvarača kao i dodatni gubici snage, što u praksi može ugroziti funkcionalnost pretvarača.

4.2 Primjer određivanja strukture pretvarača

Poznavanje uvjeta opstojnosti procesa pretvorbe (16 – 18) te predznaka istosmjernih snaga pretvaračkih komponenata (22 – 24) omogućuje, uz uvjet da je pretvaračka mreža dobro definirana mreža, da se pronađu strukture pretvarača kojima se s minimalnim brojem konstitutivnih komponenata može ostvariti zahtijevani proces pretvorbe. Pokažimo to na primjeru određivanja strukture (sheme spoja) istosmjernog pretvarača napona za povezivanje istosmjernog naponskog izvora s trošilom modeliranim istosmjernim naponskim uvorom¹⁵.

Minimalnu strukturu istosmjernog pretvarača napona čine dvije sklopke. No, odmah se vidi da bi se s pomoću samo dvije sklopke, neovisno o tome sklapaju li one protutaktno ili kako drugačije, uvijek dobila ili loše definirana mreža ili ne bi bio moguć prijenos energije. Zbog toga je nužno dodati jednu reaktivnu komponentu, a sklopke trebaju sklapati protutaktno. Potrebna reaktivna komponenta nije kondenzator jer bi se u svim mogućim spojevima dviju sklopki i kondenzatora sklapanjem sklopki stvarale kapacitivne petlje. Proizlazi da (istosmjerni) pretvarač (napona) mora u strukturi s minimalnim brojem konstitutivnih komponenata sadržavati dvije sklopke i prigušnicu.

Naponski izvor napona E i naponski uvor napona U_d ne smiju ni u jednom trenutku biti kratko spojeni. Zbog toga je potrebno da je jedna od sklopki spojena u seriju s naponskim izvorom, a druga sklopka u seriju s naponskim uvorom.

¹⁵ Trošilo se ponaša kao istosmjerni naponski uvor, ako se na izlaz istosmjernog pretvarača napona spoji kondenzator tolike kapacitivnosti C_d da je $R_d C_d \gg T_s$, gdje je R_d nadomjesna otpornost trošila a T_s sklopna perioda pretvarača [5].

Jedina struktura pretvaračke mreže koja u svakom trenutku rada omogućuje da je ta mreža dobro definirana prikazana je na slici 6.

Uočimo da su referentni smjerovi napona i struja izvora i uvara naznačeni na slici 6 jednaki stvarnim smjerovima napona i struja izvora i uvara, što znači da su iznosi napona izvora i uvara te srednje vrijednosti struja izvora i uvara pozitivne vrijednosti. Zbog protutaktnog sklapanja sklopki V1 i V2 stvarni smjer struje kroz prigušnicu je od čvora 1 prema čvoru 2. Time su određeni i stvarni smjerovi srednjih vrijednosti napona sklopki V1 i V2.

U periodičkom stanju srednja vrijednost napona induktiviteta L jednaka je nuli te iz jednadžbi Kirchhoffova zakona napona za srednje vrijednosti

$$E - U_{V1}(0) = 0, \quad U_d + U_{V2}(0) = 0$$

proizlazi da je zbog $E > 0$ i $U_d > 0$

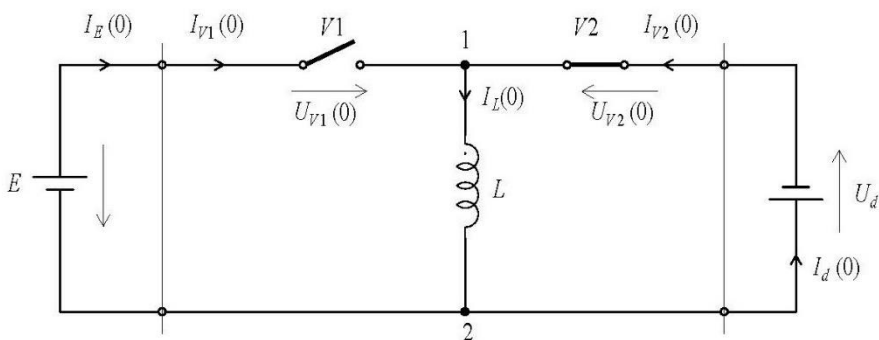
$$U_{V1}(0) = E > 0, \quad U_{V2}(0) = -U_d < 0$$

dok za srednje vrijednosti struja vrijedi da je

$$I_{V1}(0) = I_E(0), \quad I_{V2}(0) = I_d(0)$$

Zbog toga je istosmjerna snaga sklopke V1 pozitivna i jednaka ulaznoj djelatnoj snazi pretvarača

$$P_{V1}(0) = U_{V1}(0)I_{V1}(0) = EI_E(0) > 0$$



Sl. 6 Dobro definirana pretvaračka mreža koju tvore izvor, istosmjerni pretvarač napona i trošilo

dok je istosmjerna snaga sklopke V2 negativna i jednaka izlaznoj djelatnoj snazi pretvarača

$$P_{V2}(0) = U_{V2}(0)I_{V2}(0) = U_d I_d(0) < 0$$

Ulazna istosmjerna snaga pretvarača transformirana je sklopkom V1 u izmjeničnu djelatnu snagu i zatim ponovno transformirana sklopkom V2 u istosmjernu snagu i prenesena u trošilo.

Budući da je istosmjerna snaga sklopke V1 pozitivna, ona je upravljiva i može biti realizirana kao strujno jednosmjerna sklopka ili naponski jednosmjerna sklopka. Istosmjerna snaga sklopke V2 je negativna te se može realizirati ne samo strujno ili naponski jednosmjernom sklopkom nego i neupravljivom sklopkom. S obzirom na to da iznosom djelatne snage upravlja sklopka V1, a sklopka V2 tu djelatnu snagu samo transformira, dovoljno je da sklopka V2 bude neupravljiva.

Činjenica da ni u jednom trenutku ne postoji izravan spoj izvora i trošila zbog čega je sva istosmjerna snaga preuzeta iz izvora transformirana u izmjeničnu djelatnu snagu, omogućuje da se na jednostavan način, ako je to potrebno, ostvari galvansko odvajanje istosmjernog izvora od istosmjernog trošila. Dovoljno je samo da se umjesto prigušnice induktivnosti L na njezino mjesto spoji primarni namot transformatora induktivnosti magnetiziranja L a da se na sekundarni namot spoje u seriju spojene sklopka V2 i trošilo.

Istaknimo još da izravan spoj sklopkom izvora i trošila unutar dijela sklopne periode ne stvara loše definiranu mrežu jedino ako su izvor i trošilo različitog karaktera, primjerice, pri povezivanju naponskog izvora sa strujnim uvorom. U tim je slučajevima u minimalnoj strukturi pretvarača dovoljno upotrijebiti samo dvije protutaktno sklapane sklopke. Očigledno, zbog izravnog spoja između izvora i trošila galvansko odvajanje nije ostvarivo i moguće je tek znatnijim usložnjavanjem strukture pretvarača [5].

Zaključna razmatranja

Statički pretvarači su električki energetske uređaji spojeni između pojne mreže i trošila sa svrhom da prilagode električke karakteristike pojne mreže električkim karakteristikama trošila. Nužni dio svakog statičkog pretvarača jest pretvarački sklop, tj. električka mreža koja preuzima djelatnu snagu raspoloživu na frekvenciji izvora električne energije u pojnoj mreži, transformira ju u djelatnu snagu na željenoj frekvenciji trošila i predaje trošilu. Zbog toga u pretvaračkom sklopu svakog statičkog pretvarača moraju postojati pasivne komponente koje djeluju kao transformatori djelatne snage na frekvenciji. Te se komponente nazivaju pretvaračke komponente.

Električka mreža mora biti nelinearna da bi bila pretvarački sklop nekog statičkog pretvarača. Naime, u svakoj nelinearnoj električkoj mreži pojavljuju se u periodičkom ustaljenom stanju u valnim oblicima napona i struje svih komponenata harmonijski članovi na frekvencijama različitim od frekvencije izvora. Zbog toga se, u općem slučaju, pojavljuju na tim frekvencijama i djelatne snage komponenata promatrane električke mreže. Nelinearne komponente u toj električkoj mreži ponašaju se kao izvori djelatne snage na frekvencijama različitim od frekvencije izvora odnosno kao trošila na frekvenciji izvora. U skladu s načelom ravnoteže djelatnih snaga na frekvenciji sve ostale komponente statičkog pretvarača uključujući i trošila ponašaju se kao trošila koja preuzimaju djelatnu snagu stvorenu nelinearnim komponentama. U nelinearnim komponentama događa se transformacija djelatne snage na frekvenciji.

Iako je svaka nelinearna komponenta transformator djelatne snage na frekvenciji, ona nije ujedno i pretvaračka komponenta. Naime, kao i u svakom energetskom uređaju bitno je da u statičkom pretvaraču budu minimalizirani gubici snage. To znači da sve komponente koje tvore električku energetsku mrežu nekog statičkog pretvarača moraju biti nazivno nedisipativne komponente. Zbog toga su jedine dopuštene konstitutivne komponente svakog statičkog pretvarača reaktivne komponente (kondenzatori, prigušnice, transformatori), a od disipativnih komponenata jedino periodički sklapane sklopke.

U većini primjena traži se da statički pretvarač upravlja iznosom transformirane djelatne snage. Zbog toga u upravljivim statičkim pretvaračima barem jedna pretvaračka komponenta mora biti vremenski promjenljiva. Taj zahtjev odmah eliminira vremenski promjenljive reaktivne komponente jer one zbog svog načina rada nisu nazivno nedisipativne komponente. Vremenski nepromjenljive nelinearne reaktivne komponente to jesu, no njihova je primjena kao pretvaračkih komponenata moguća jedino u neupravljivim izmjeničnim pretvaračima frekvencije fiksnog cjelobrojnog odnosa između frekvencije izvora i frekvencije trošila. Potrebe za tom vrstom statičkih pretvarača praktički ne postoje, tako da se ni vremenski nepromjenljive nelinearne reaktivne komponente ne ubrajaju među pretvaračke komponente.

Proizlazi da se među pretvaračke komponente ubrajaju samo disipativne komponente u sklopnom načinu rada – periodički sklapane sklopke – relizirane u praksi isključivo s pomoću poluvodičkih ventila. Sa stajališta transformacije djelatne snage na frekvenciji, velika je raznovrsnost poluvodičkih ventila koji se upotrebljavaju u praksi samo prividna. Stvarno postoje samo četiri različite vrste pretvaračkih komponenata. To su neupravljiva sklopka, strujno jednosmjerna sklopka, naponski jednosmjerna sklopka i dvosmjerna sklopka, pretvaračka svojstva kojih se lako određuju uvidom u njihove $u - i$ karakteristike.

Da bi statički pretvarač ispravno radio nužno je da u svakom trenutku rada pretvaračka mreža, tj. lančani spoj, pojne mreže, energetske mreže statičkog pretvarača i trošila, bude dobro definirana mreža. Pretvaračka mreža je dobro definirana ako se sklapanjem sklopki ne mogu stvoriti kapacitivne petlje odnosno induktivni čvorovi. U protivnom, u statičkom pretvaraču stvaraju se dodatni gubici snage, a rad mu ovisi o parazitnim parametrima energetskih komponenata pretvarača.

Promatrajući statičke pretvarače sa stajališta njihovih osnovnih energetskih svojstava proizlazi da je svaki statički pretvarač **električka mreža s periodički sklapanim sklopkama** kojom je ostvarena **nazivno nedisipativna transformacija djelatne snage** preuzete iz pojne mreže na skupu frekvencija izvora u djelatnu snagu predanu trošilu na skupu frekvencija trošila i koja zajedno s pojnom mrežom i trošilom tvori **dobro definiranu mrežu**.

Istaknimo još da se, u ovome radu, pri razmatranju energetskih svojstava statičkih pretvarača uopće ne spominju dva važna tehnička pojma: jalova snaga i prividna snaga. U nelinearnim električkim mrežama, kao što su to mreže s periodički sklapanim sklopkama, ti pojmovi, za razliku od pojma djelatne snage, nemaju fizikalno značenje tako da njihovo nespominjanje ne utječe nimalo na objašnjenje rada statičkih pretvarača i njihovih osnovnih energetskih svojstava. Za elektrotehničara ti su pojmovi itekako važni, no njihova interpretacija kao i utjecaj na izbor struktura statičkih pretvarača zahtijeva posebnu analizu izvan dosega ovoga rada.

Literatura

- [1] Flegar, I., Some general properties of power electronic conversion networks, *Archiv für Elektrotechnik*, Bd. 68, 1985., S. 365 – 372
- [2] Flegar, I., Proces pretvorbe u statičkim pretvaračima, *Automatika*, 1 – 2, 1992., str. 13 – 20
- [3] Flegar, I., Pretvaračka svojstva komponenata statičkih pretvarača, *Automatika*, 1 – 2, 1993., str. 11 – 18
- [4] Flegar, I., Some circuit theory based concepts of power electronics, 9th *International Conference on Power Electronics and Motion Control*, Košice, 2000., str. 7–194 do 7–199
- [5] Flegar, I., *Elektronički energetski pretvarači*, Kigen, Zagreb, 2010.
- [6] Flegar, I., Energija kao kvazimaterijalna veličina, 10. simpozij: *Povijest i filozofija tehnike*, Hrvatski ogranak CIGRE, 2021., str. 67 – 86

- [7] Griffiths, D. J., *Introduction to Electrodynamics*, Pearson Education Inc., Glenview, USA, 2013.
- [8] Haus, H. A., Melcher, J. R., *Electromagnetic Fields and Energy*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1989.
- [9] Penfield, P., *Power – frequency formulas*, The Technology Press of the M.I.T and John Wiley & Sons, Inc., New York – London, 1960.
- [10] Barkhausen, H., *Das Problem der Schwingungserzeugung*, Verlag von S. Hirzel, Leipzig, 1907.
- [11] Penfield, P. Jr., Spence, R., Duinker, S., *Tellegen's Theorem and Electrical Networks*, Research Monograph No. 58, The M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts and London, England, 1970
- [12] Desoer, C. A., Kuh, E. S., *Basic circuit theory*, Tokio, Mc Graw Hill – Kogakusha, 1969.
- [13] Flegar, I. *Osnove projektiranja električkih uređaja*, 3. izdanje, Element, Zagreb, 2020.

BASIC POWER PROPERTIES OF STATIC CONVERTERS

Abstract: By decomposition of the active power into frequency components and by applying the principle of balance of active power at frequency, it has been shown that the power network of any static converter can be considered as a transformer of the active power at frequency. Starting from these premises, the existence conditions of conversion process for all types of static converters are directly derived. Taking into account the general principle of minimizing power losses in power networks, the concept of conversion device is defined and the conversion properties of all constituent power devices (periodically operated switches and reactive devices) of static converter power networks are described. All the power properties of static converters are derived disregarding the power network structures of particular static converters. Also, it is explained why the conversion network, i.e. the cascade connection of the power supply, the static converter power network and the load, has to be a well-defined network. It is shown on the example of a dc converter for connecting a dc voltage source with a dc voltage sink that this requirement determines the structure of the dc converter's power network.

Key words: active power at frequency, conversion device, conversion network, existence conditions, static converter, well-defined network

Ivan Flegar