

1.

Uvod u energetsku elektroniku

Glavni ishodi učenja za ovo poglavlje su:

- stvaranje svijesti o načelima rada elemenata energetske elektronike
- određivanje ključnih značajki i parametara energetskih pretvarača
- analiziranje načina rada energetskih pretvarača s obzirom na valni oblik
- proučavanje primjene energetskih pretvarača u raznim sustavima

Sadržaj poglavlja:

- 1.1.** Vrste energetskih pretvarača
- 1.2.** Primjena energetskih pretvarača

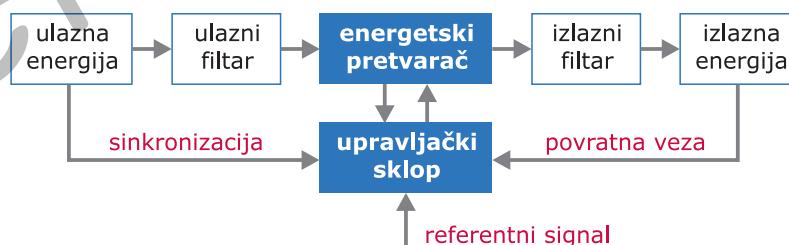
Uvod

Energetska elektronika je grana elektrotehnike koja se bavi pretvorbom i upravljanjem električne energije s pomoću električnih energetskih pretvarača koji koriste energetske poluvodičke sklopove. Energetskom elektronikom proučavamo komponente energetskih sklopova, istosmjerne i izmjenične prekidače, regulacijske krugove, upravljačke sklopove, signalizacijske sklopove i dr.

Napomena

↳ Osim naziva energetska elektronika, koristi se također i naziv učinska elektronika.

Snagu ulazne energije dobivamo npr. iz izmjeničnog napajanja, a snagu izlazne energije trošimo npr. na priključenom motoru. Priključak sustava energetske elektronike na električnu mrežu o spojno trošilo može biti jednofazni ili trofazni, neovisno jedan o drugome.



Slika 1.1. Blok-dijagram sustava energetske elektronike



POGLED U POVIJEST

Energetska elektronika započela je razvojem električnog živinog ispravljača koji je 1901. godine napravio američki inženjer elektrotehnike i izumitelj Peter Cooper Hewitt (1861. – 1921.). Električni luk korišten je u procesima prekidanja strujnih krugova u električnim sklopnim aparatima i u procesima ispravljanja izmjenične struje.

Energetski pretvarači povezuju dva ili više različita električna sustava. Kao što je vidljivo iz slike 1.1, energetski pretvarači upravljaju tokom električne energije između izvora električne energije i trošila. Osim električnih veličina, energetski pretvarači mogu upravljati i neelektričnim veličinama kao što su: brzina vrtnje motora, jakost svjetlosti, temperatura itd. Energija koja se dovodi u sustav snage P_{ul} i energija koju sustav daje na izlazu snage P_{iz} , mora ostvariti povoljan **stupanj korisnosti** η . Razliku ulazne i izlazne energije sustav obično pretvara u toplinu kao gubitak energije, odnosno snage P_{gub} . Nastala toplina mora se odvesti iz sustava preko sustava za hlađenje, što ujedno određuje i veličinu samog energetskog sklopa. Stupanj korisnosti računa se prema izrazu:

$$\eta = \frac{P_{iz}}{P_{ul}} = \frac{P_{iz}}{P_{iz} + P_{gub}}.$$

Primjer 1.1.

Energetski pretvarač iz mreže dobiva 100 kW snage, a priključenom motoru daje 90 kW. Koliki su gubitci u sustavu, a koji je stupanj korisnosti?

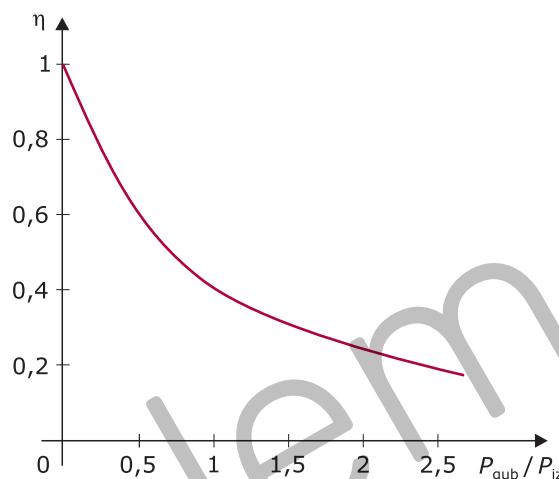
Rješenje:

Gubitci u sustavu računaju se kao razlika ulazne i izlazne snage:

$$P_{gub} = P_{ul} - P_{iz} = 100 \text{ kW} - 90 \text{ kW} = 10 \text{ kW}.$$

Stupanj korisnosti iznosi:

$$\eta = \frac{P_{iz}}{P_{ul}} = \frac{90 \text{ kW}}{100 \text{ kW}} = 0.9 = 90 \text{ \%}.$$



Slika 1.2. Stupanj korisnosti pretvarača

Krivilja sa slike 1.2 pokazuje kako se mijenja stupanj korisnosti u ovisnosti omjera snage gubitaka i izlazne snage. Idealni energetski pretvarač imao bi stupanj korisnosti jednak jedinici, što bi značilo da nema gubitaka.

Mnogi energetski sustavi koriste energetske pretvarače s visokim stupnjem korisnosti za pretvorbu izlazne energije bez velikih gubitaka. Takvi energetski pretvarači u sebi sadrže energetske poluvodičke komponente, odnosno sklopke, koje mogu ostvariti takav visoki zahtjev. Osim energetskih poluvodičkih komponenata, energetski pretvarači također

koriste i magnetske kao što su npr. transformatori, filtarske prigušnice itd., te pasivne komponente.

Osim stupnja korisnosti postoji i **faktor snage** koji govori koliko se privedene snage priključene mreže pretvara u djelatnu snagu koja se predaje trošilu u pretvaraču. Faktor snage definira se izrazom:

$$\cos \varphi = \chi = \frac{P_{ul}}{S_{ul}}.$$

Faktor snage kreće se u granicama između nule i jedinice kao i stupanj korisnosti. U sustavu je poželjno imati faktor snage što bliži vrijednosti jedinice jer se time smanjuju gubitci, odnosno jalova snaga Q u mreži.

Primjer 1.2.

Na natpisnoj pločici motora pišu sljedeći podatci: $P = 1 \text{ MW}$, $\cos \varphi = 0.833$. Koliko je snage potrebno privesti motoru preko energetskog pretvarača da on može ostvariti takav rad? Koliki su gubitci koji nastaju u energetskom pretvaraču?

Rješenje:

Pravidna snaga mreže dobiva se izrazom:

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{1 \cdot 10^6}{0.833} = 1.2 \text{ MVA}.$$

Gubitke sustava predstavlja jalova snaga:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = 0.663 \text{ MVAr.}$$

Zadatak **upravljačkog sklopa** je da na temelju informacije o npr. željenoj brzini vrtnje motora (referentni signal) i stvarnoj brzini motora dobivenoj preko povratne veze, upravlja okidnim sklopom. Okidni sklop nalazi se u upravljačkom sklopu i smatra se njegovim sastavnim dijelom. On će u sinkronizaciji s ulaznom energijom upravljati energetskim poluvodičkim komponentama unutar energetskog pretvarača i na takav način indirektno upravljati izlaznom energijom. Električne poluvodičke komponente npr. diode, tranzistori ili tiristori, rade kao sklopke i tako upravljaju naponom ili strujom, odnosno mijenjaju njihovu vrijednost. Upravljački sklopovi ne koriste se magnetskim elementima zbog njihovih velikih dimenzija. S druge strane, energetska elektronika u pretvaračkim sklopovima ne koristi otpornike i poluvodiče u linearном načinu rada zbog velike disipacije snage na tim elementima. Kao što je već rečeno, pretvarački sklopovi moraju raditi s malim gubitcima. Upravljački sklop ima značajnu ulogu u osiguravanju pouzdanog rada cijelog sustava. U slučaju pogreške može unutar upravljačkog sklopa doći do toga da energetski pretvarač, opterećenje ili izvor napajanja nije više u radnoj funkciji.

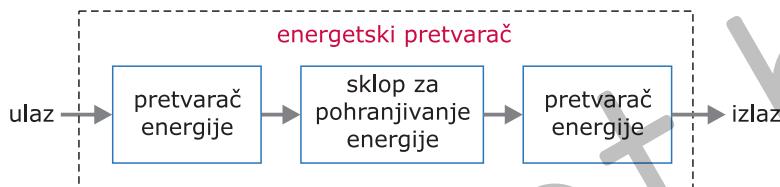
Sustav energetske elektronike sadrži i neke druge elemente npr. filtre za otklanjanje smetnji, te neke mehaničke komponente npr. noseće konstrukcije i rashladna tijela.

U današnje vrijeme sustavi energetske elektronike izvode se s pomoću sklopova digitalne elektronike čiji sklopni elementi mogu raditi sa snagom od nekoliko milivata [mW] pa do nekoliko gigavata [GW]. Može se reći da je zadatak sustava energetske elektronike pretvorba i kontrola snage korištenjem energetskih sklopki malih snaga koje mogu raditi s malim i velikim razinama snage.

Budućnost energetske elektronike nije upitna zbog stalne ljudske težnje prema poboljšanju standarda življenja jeftinom i čistom energijom. Stoga, sustavi energetske elektronike moraju odgovoriti na sve veće potrebe za očuvanjem i pretvorbom energije uz visok stupanj korisnosti. Izazov današnjih i budućih inženjera je projektirati nove i optimalne topologije i uređaje sustava energetske elektronike koji će odgovoriti energetskim potrebama tržišta.

1.1. Vrste energetskih pretvarača

Funkcionalnost energetskih pretvarača određena je njihovom sposobnošću da osiguraju potrebne ulazne i izlazne parametre u svim uvjetima rada. **Pouzdanost energetskih pretvarača** ovisi o pouzdanosti komponenata koje se koriste u radu, složenosti sustava, dizajnu komponenata, proizvodnoj tehnologiji, učinkovitosti hlađenja i sigurnosnim mjerama sustava. Kao što je vidljivo na slici 1.3, energetski pretvarač može imati nekoliko pretvaračkih stupnjeva te sklop za pohranjivanje energije između njih, npr. zavojnice i kondenzatore.

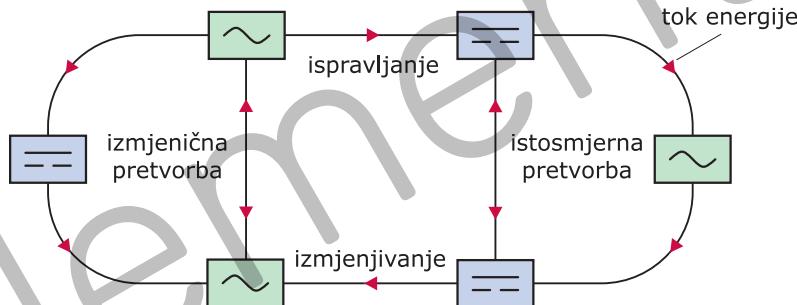


Slika 1.3. Blok-dijagram energetskog pretvarača

Energetske pretvarače možemo podijeliti u nekoliko kategorija prema valnom obliku na ulazu spram onog na izlazu. To su:

- **izmjenično-istosmjerni pretvarači** (ispravljači, engl. *AC/DC converters*) – povezuju izmjeničnu mrežu s istosmjernim trošilom te ispravljaju ulazni izmjenični oblik signala u istosmjerni
- **istosmjerno-izmjenični pretvarači** (izmjenjivači, engl. *DC/AC converters*) – povezuju istosmjernu mrežu s izmjeničnim trošilom te pretvaraju istosmjerni oblik signala u izmjenični promjenjive veličine i frekvencije

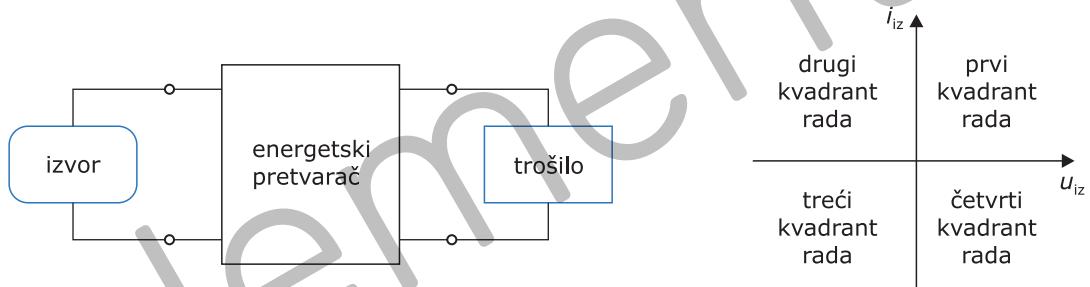
- **istosmjerno-istosmjerni pretvarači** (istosmjerni pretvarači, engl. *DC/DC converters*) – povezuju dvije istosmjerne mreže tako da se ulazni istosmjerni signal pretvara u istosmjerni više ili niže razine
- **izmjenično-izmjenični pretvarači** (izmjenični pretvarači, engl. *AC/AC converters*) – povezuju dvije izmjenične mreže tako da se ulazni izmjenični signal pretvara u izmjenični različite veličine i frekvencije.



Slika 1.4. Funkcije energetskog pretvarača

Izmjenični i istosmjeri energetski pretvarači mogu biti izravni ili neizravni. Ulazna istosmjeri ili izmjenična se energija u izravnim energetskim pretvaračima odmah pretvara u odgovarajući oblik energije na izlazu. Kod neizravnog pretvaranja vrši se dvostruka pretvorba ulazne energije da bi se na kraju dobio željeni oblik energije. Npr. kod izmjeničnog neizravnog pretvarača pretvorba se vrši tako da se prvim ispravljačem izmjenična vrijednost pretvori u istosmjeru, a zatim istosmjeru u izmjeničnu vrijednost. Na isti način radi i istosmerni neizravni pretvarač.

Ovisno o primjeni energetskih pretvarača postoje mnoge izvedbe njihove topologije. Kada se odabire topologija energetskog pretvarača za određeni sustav energetske elektronike, potrebno je voditi računa o tome kakva će se pretvorba izvršavati unutar sustava, odnosno pretvarača. Također je potrebno odrediti primjerene energetske ventile (sklopke) na temelju njihovih karakteristika, upravljačke sklopove i zaštitu, proračunati gubitke unutar sustava, njegovu cijenu, težinu i veličinu.



Slika 1.5. Jednostavni energetski pretvarač s mogućim modovima rada

Ovisno o korištenoj topologiji energetski pretvarači mogu raditi u oba smjera. U nekim primjenama, npr. u istosmjernim elektromotornim pogonima energetski pretvarač radi u jednom vremenskom intervalu kao ispravljač koji obavlja funkciju ispravljanja napona, a u drugom kao izmjenjivač. Takav se energetski pretvarač još naziva **usmjerivač**. Kako polaritet izlaznog napona i struje može biti pozitivan i negativan, možemo definirati četiri kvadranta rada.

U prvom kvadrantu rada izlazni napon i struja uvijek su pozitivni i energetski pretvarač radi samo u smjeru od izvora do trošila. Primjeri takvog rada mogu se naći kod istosmjerno-istosmjernih pretvarača gdje je potrebno podići ili spustiti razinu napona, odnosno struje. Istosmjerno-istosmjerni pretvarač može također koristiti treći kvadrant rada koji mu omogućuje rad u oba smjera. U njemu imamo negativnu vrijednost napona i struje. Energetski pretvarači koji imaju priključen istosmjerni motor kao trošilo, moraju imati mogućnost rada u prvom i drugom kvadrantu. Istosmjerni motori ovisno o smjeru vrtnje mogu raditi sa pozitivnim ili negativnim naponom. Ako je za trošilo spojen istosmjerni generator, pretvarač mora omogućiti rad u drugom i četvrtom kvadrantu jer je smjer energije sada od trošila prema izvoru. Iz ovakvih je primjera vidljivo da je potrebno pomno odrediti topologiju energetskog pretvarača i energetske sklopke koji mogu raditi u potrebnim kvadrantima rada. Karakteristike energetskih sklopki i njihov izbor obrađen je u poglavljvu 2.

Energetski pretvarači zahtijevaju određene uvjete spajanja izvora napajanja. Prema temeljnim načelima električnih krugova nije moguće spojiti dva idealna naponska izvora paralelno ili dva idealna strujna izvora serijski. Stoga, trošila pretvarača ne mogu biti izvori napona ili struje. Energetski pretvarač s naponskim izvorom mora imati njemu paralelno spojen kondenzator. Ulagani filter, odnosno kondenzator djeluje preventivno protiv induktivne unutarnje impedancije, a ona nastaje zbog naponskog izvora koji nije idealan. Također, ako je potrebno, moguće je spojiti zavojnicu u seriju koja djeluje preventivno na vrijednosti struja.



Slika 1.6. Blok-dijagram energetskog pretvarača s naponskim izvorom

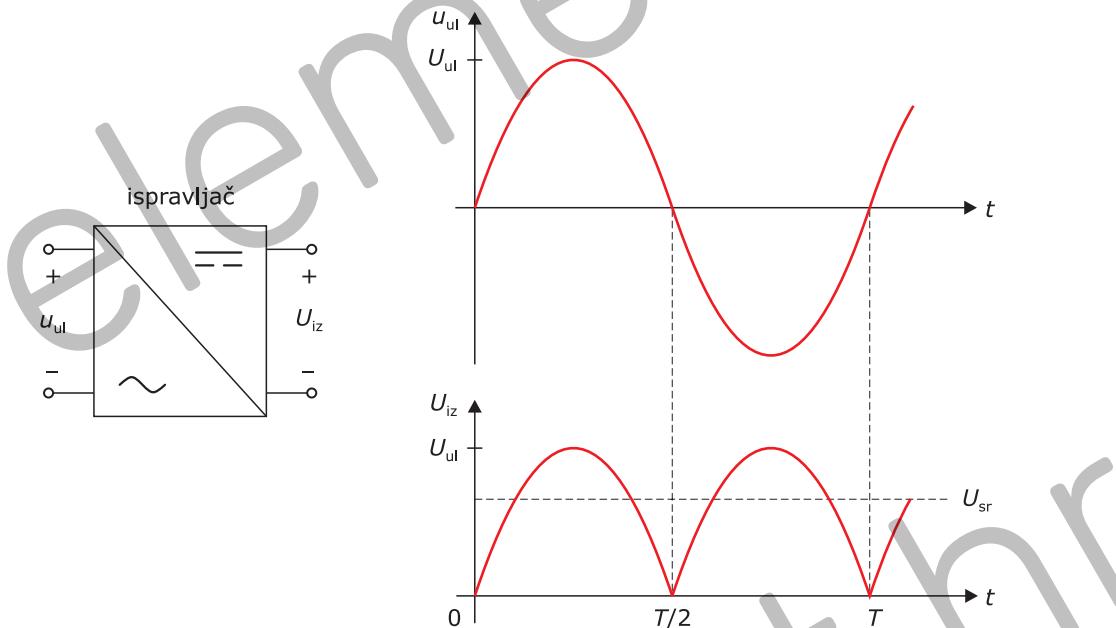


Slika 1.7. Blok-dijagram energetskog pretvarača sa strujnim izvorom

Bitno je naglasiti da kod spajanja energetskih pretvarača u sustav koji ima izvore napajanja s jedne i druge strane pretvarača, potrebno je također ugraditi ulazne i izlazne filtre kako ne bi došlo do nepoželjnog međusobnog spajanja izvora različitih vrijednosti.

1.1.1. Izmjenično-istosmjerni pretvarači

Potreba za pretvorbotom izmjenične snage u istosmjernu u prošlom je stoljeću nastala izumom vakumskih cijevi, tranzistora, integriranih krugova i samih računala. Današnji moderni ispravljači mogu mnogo više nego samo izvršiti pretvorbu.



Slika 1.8. Pojednostavljeni blok-dijagram izmjenično-istosmjernog pretvarača i izgled signala

Izmjenično-istosmjerni pretvarači, odnosno **ispravljači** pretvaraju izmjenični oblik napona (struje) u istosmjerni oblik veće ili manje snage, ovisno o potrebi priključenog trošila. Slika 1.8 prikazuje blok-dijagram ispravljača i tipične ulazne i izlazne valne oblike signala. Za postizanje izlaznog istosmjernog signala potrebno je koristiti izlazni filter koji će smanjiti neželjenu izmjeničnu komponentu signala.

Ovisno o vrsti sklopki izmjenično-istosmjerni pretvarači mogu se podijeliti na neupravljive i upravljive. Neupravljivi ispravljači koriste diode kao sklopke, dok

ZANIMLJIVOST

Razvija se nova generacija ispravljača koja može raditi u području teraherca [THz] i pretvarati svjetlosnu energiju u istosmjernu struju. S druge strane, provode se istraživanja u razvijanju jedne organske molekule koja bi funkcionalala kao ispravljač.

upravljeni koriste tiristore. Oba tipa ispravljača mogu se priključiti na jednofazni ili trofazni ulazni izvor napona. Osnovna svojstva sklopki opisana su u poglavlju 2., a vrste i rad ispravljača u poglavlju 3.

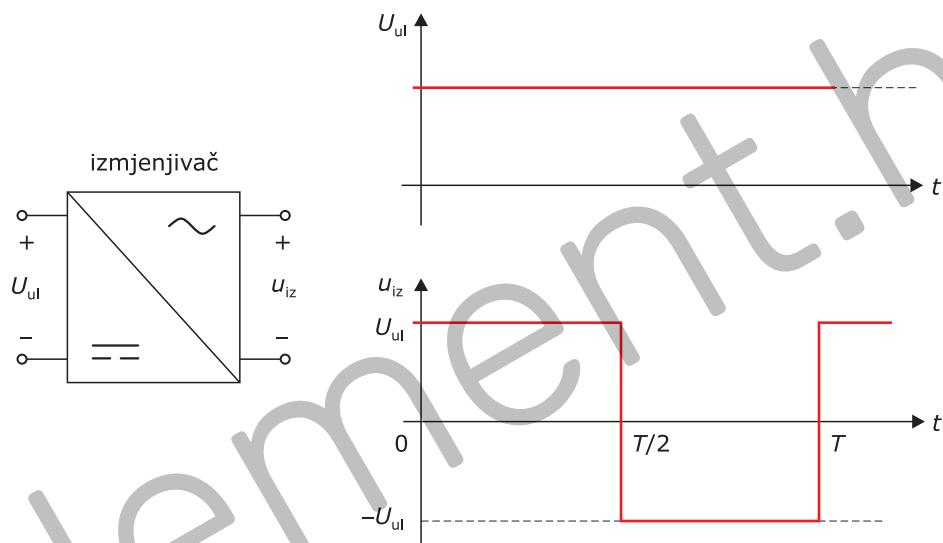
Neupravljeni izmjenično-istosmjerni pretvarači koriste se u sustavima za izvanmrežni rad, u punjačima baterija, u sustavima sa istosmjernim motorom itd. No, upravljeni izmjenično-istosmjerni pretvarači imaju širu primjenu nego neupravljeni. Koriste se za regulaciju istosmjernih izvora napajanja, pri kontroli brzine vrtnje istosmjernih i izmjeničnih motora, u punjačima baterija, za regulaciju induksijskog grijaca, u raznim elektromehaničkim sustavima, u prijenosu visokog napona, pri regulaciji rasvjete itd.

1.1.2. Istosmjerno-izmjenični pretvarači

U energetskoj elektronici više se koristi naziv **izmjenjivači** za istosmjerno-izmjenične pretvarače. Oni pretvaraju istosmjerni oblik napona u izmjenični, ako energija ima smjer od trošila prema izmjeničnom izvoru. Prema karakteru trošila možemo ih podijeliti na neautonomne i autonomne. Neautonomni izmjenjivači za ispravan rad moraju imati spojenu izmjeničnu mrežu, dok za autonomne to nije nužno. Slika 1.9 prikazuje blok-dijagram izmjenjivača te tipične ulazne i izlazne valne oblike napona.

Napomena

↪ Izmjenjivač pretvara istosmjerni (baterijski) napon u regulirani izmjenični napon određenog iznosa i frekvencije gdje valni oblik može biti npr. pravokutnog oblika.

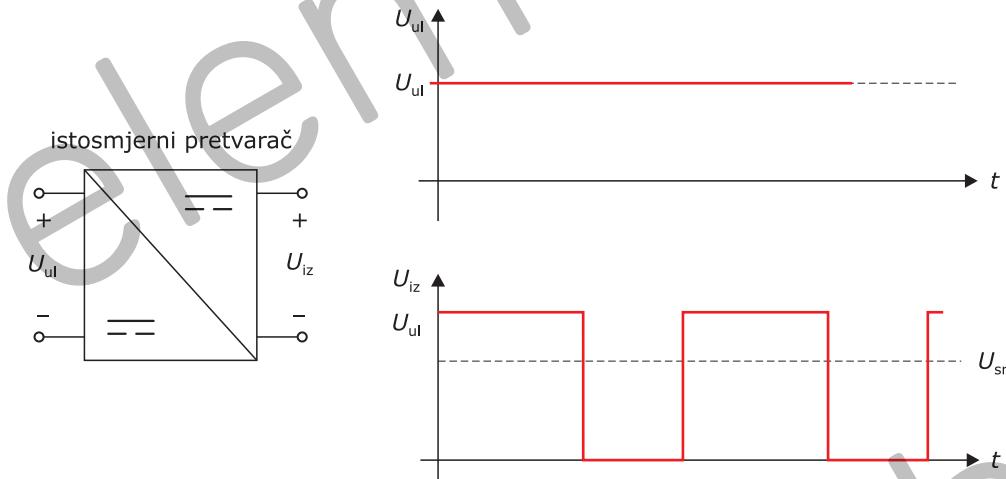


Slika 1.9. Pojednostavljeni blok-dijagram istosmjerno-izmjeničnog pretvarača i izgled signala

Istosmjerno-izmjenični pretvarači danas imaju široku primjenu i nalaze se u raznim sustavima. Koriste se kod napajanja izmjeničnih motora kojima je potrebno mijenjati brzinu vrtnje npr. dizala, u sustavima za neprekidno napajanje izmjeničnim naponom, u komunikacijskim uređajima, u mjernim sustavima, u zrakoplovnoj industriji, pri regulaciji rasvjete i klimatizacije, u električnim sustavima transporta itd.

1.1.3. Istosmjerno-istosmjerni pretvarači

Istosmjerno-istosmjerni pretvarači, odnosno **istosmjerni pretvarači** koriste se u energetskoj elektronici za pretvaranje istosmrjene vrijednosti napona (struje) na određenu potrebnu razinu, kao što je to prikazano na slici 1.10.



Slika 1.10. Pojednostavljeni blok-dijagram istosmjerno-istosmjernog pretvarača i izgled signala

Napomena

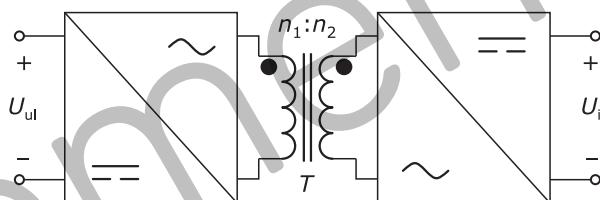
↪ Istosmjerno-istosmjerni pretvarači privremeno pohranjuju ulaznu energiju preko komponenta kao što su kondenzatori, zavojnice ili transformatori.

Postoji još jedan način povezivanja i pretvorbe parametara istosmjernih sustava. On se ostvaruje indirektnim načinom korištenjem istosmjerno-izmjeničnog i izmjenično-istosmjernog pretvarača. Na ulaz se dovodi istosmjerni oblik napona koji se pretvara u izmjenični i dovodi na ulaz izmjenično-istosmjernog pretvarača. On ga ponovno pretvara u istosmjerni oblik na izlazu. Između dva pretvarača moguće je ugraditi transformator i galvanski odvojiti dva istosmjerna sustava. Na takav način dobivamo izravne i neizravne (galvanski izolirane) pretvarače. Slika 1.11 prikazuje blok-dijagram galvanski izoliranog istosmjernog pretvarača uz omjer transformatora $n_1 : n_2$.

Osnovna značajka istosmjernih pretvarača je slobodan izbor radne frekvencije do 50 kHz. Ipak frekvencija je ograničena gubitcima u aktivnim poluvodičkim sklopkama i reaktivnim

komponentama. Primjenu istosmjernih pretvarača nalazimo u napajanju elektroničke opreme gdje se pretvaračima upravlja tokom električne energije između dva istosmjerna sustava, upravlja se brzinom vrtnje istosmjernog motora, a primjenjuje se i u sustavima napajanja baterija u digitalnoj i analognoj elektronici npr. audiopojačalo, u sustavima obnovljivih izvora energije, u sustavima transporta itd.

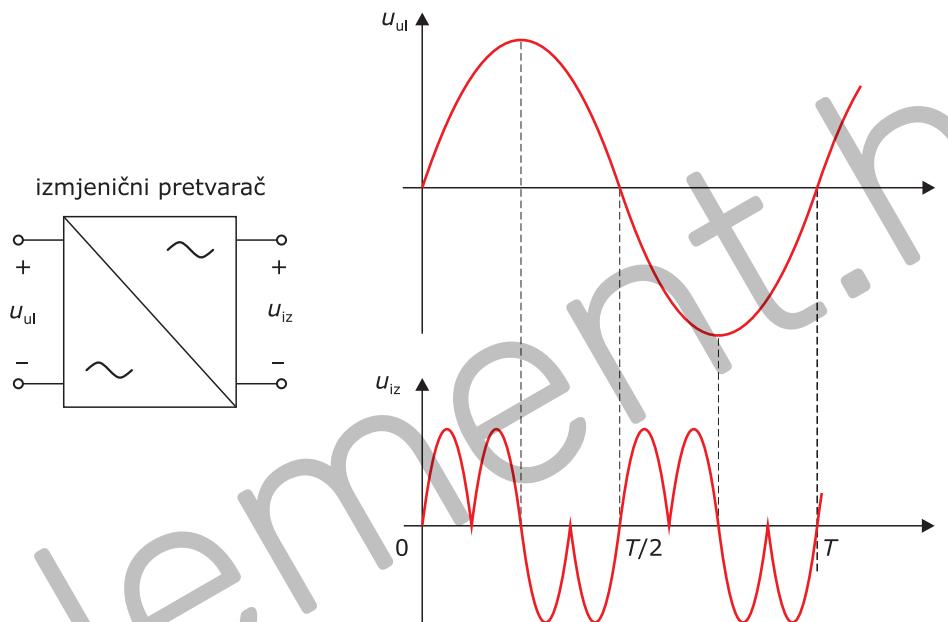
U distribucijskim mrežama izmjenično-izmjenični pretvarači mogu se koristiti za povezivanje mreža frekvencije 50 Hz i 60 Hz.



Slika 1.11. Pojednostavljeni blok-dijagram neizravnog istosmjerno-istosmjernog pretvarača

1.1.4. Izmjenično-izmjenični pretvarači

U energetskoj elektronici izmjenično-izmjenični pretvarači, odnosno **izmjenični pretvarači** koriste se za pretvaranje izmjeničnih parametara npr. amplitude, frekvencije i faze na određenu potrebnu vrijednost kao što je to prikazano na slici 1.12.

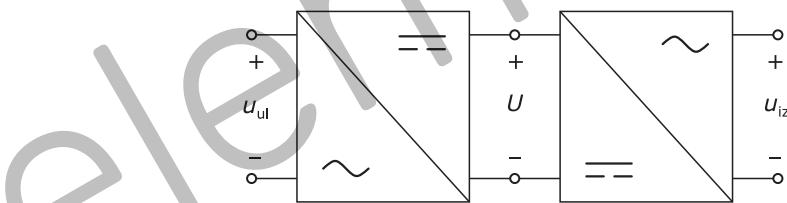


Slika 1.12. Pojednostavljeni blok-dijagram izmjenično-izmjeničnog pretvarača i izgled signala

Izmjenične pretvornike možemo podijeliti na pretvornike napona koji povezuju dva izmjenična sustava različitih amplituda napona, a jednake frekvencije te na pretvornike frekvencije tzv. ciklopretvarače u kojima se uz promjenu frekvencije može mijenjati ili amplituda napona ili faza.

Kao i kod istosmjernog pretvarača, moguće je primijeniti i neizravni izravni pretvarač koji povezuje dva izmjenična sustava. Takav pretvarač izmjenične ulazne vrijednosti pretvara u istosmrne izmjenično-istosmrnem pretvaračem, a zatim istosmrno-izmjeničnim pretvaračem ponovno pretvara u izmjenične.

Primjena izravnih izmjenično-izmjeničnih pretvarača je u regulaciji napona pri upuštanju i upravljanju asinkronih motora, pri promjeni vrtnje asinkronih motora, pri regulaciji rasvjete u zrakoplovnoj industriji itd.



Slika 1.13. Pojednostavljeni blok-dijagram neizravnog izmjenično-izmjeničnog pretvarača

1.2. Primjena energetskih pretvarača

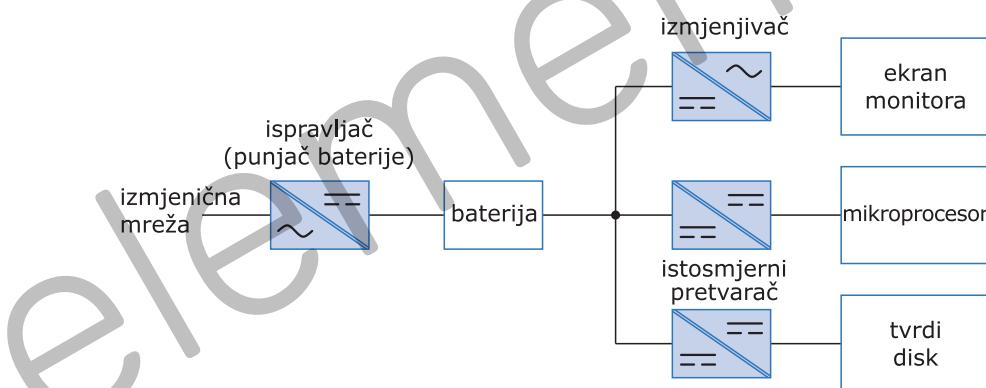
Razina snage (energije) koju koriste energetski pretvarači s visokim stupnjem korisnosti kreće se:

- od nekoliko milivata [mW], u istosmrnima pretvaračima unutar baterija prijenosne opreme
- na desetke, stotine ili tisuće vata [W], u napajanju računala i uredske opreme
- do nekoliko kilovata [kW] i megavata [MW], u motorima
- te otprilike tisuću megavata [MW] u ispravljačima i pretvaračima koji povezuju pretvorbu elektroenergetske mreže.

Energetski pretvarači također pronalaze svoju primjenu u drugim raznovrsnim industrijama, preko istosmrnih izvora napajanja, neprekidnih napajanja, u punjačima baterija telekomunikacijske industrije, u sustavima pretvarača kod obnovljivih izvora energije kao što su vjetroelektrane i fotonaponski sustavi, u sustavima za upravljanje procesima i za automatizaciju proizvodnje itd.

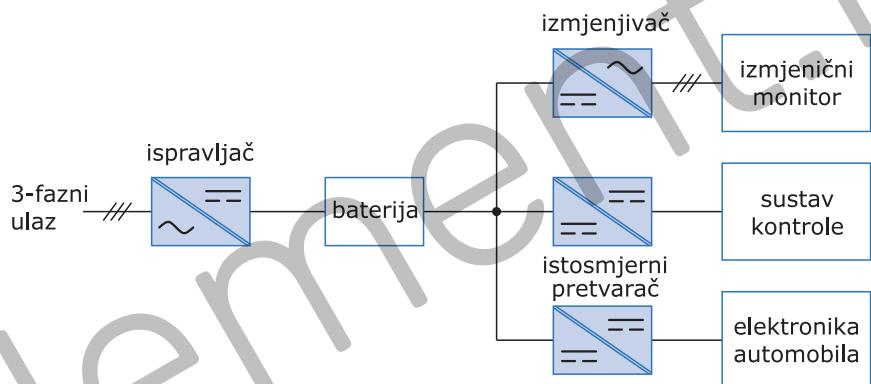
Jedan od primjera primjene energetskih pretvarača prikazan je na slici 1.14. Ispravljač ispravlja izmjeničnu vrijednost u istosmrnu za napajanje baterije.

Sustav za napajanje prijenosnog računala ima ispravljač koji ispravlja izmjeničnu ulaznu vrijednost u istosmjernu za napajanje baterije, dok nekoliko istosmjernih pretvarača mijenja napon baterije u napon potreban za trošila sustava. Silazni istosmjerni pretvarač pretvara napon na nižu razinu koja je potrebna za rad mikroprocesora. Uzlazni istosmjerni pretvarač povećava napon baterije na vrijednost koja je potrebna tvrdom disku. Izmjenjivač iz istosmrne vrijednosti pretvara u potrebiti visoki izmjenični napon i frekvenciju za ekran monitora. Ispravljač ispravlja izmjeničnu vrijednost u istosmjernu za napajanje baterije.



Slika 1.14. Pojednostavljeni sustav napajanja za prijenosno računalo

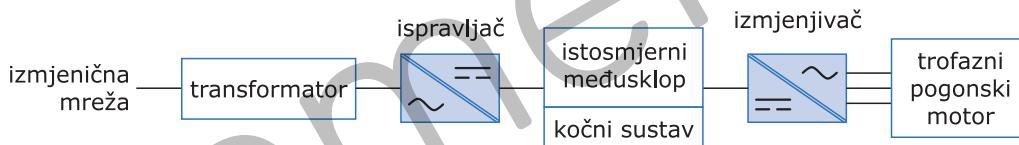
Sljedeći sustav prema slici 1.15 prikazuje **električno napajanje automobila**. Baterije automobila napajaju se iz punjača baterija koji pretvara trifazni signal velike snage u jednofazni istosmjerni signal niže snage. Baterija daje energiju izmjeničnom motoru promjenjive brzine. Brzina izmjeničnog motora kontrolira se promjenjivim naponom, odnosno frekvencijom, koju daje izmjenjivač. Također, u sustavu može biti više izmjenjivača i izmjeničnih motora spojenih na isti način. Istosmjerni pretvarač smanjuje napon baterije na vrijednosti koje su potrebne elektronici automobila i sustavu kontrole.



Slika 1.15. Pojednostavljeni blok-dijagram sustava napajanja električnog automobila

ZANIMLJIVOST

Rimac Automobili d.o.o. prva je tvrtka u Hrvatskoj koja se bavi projektiranjem, razvojem i proizvodnjom električnih vozila, pogonskih sustava i sustava baterija. Svoj prvi automobilski koncept električnog automobila Concept_One predstavila je 2011. godine.

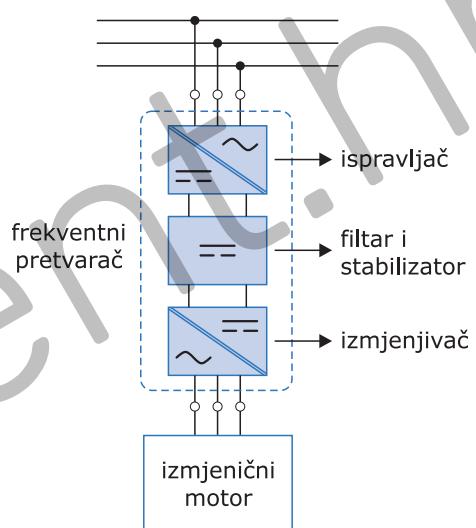


Slika 1.16. Pojednostavljeni blok-dijagram sustava kočenja vlaka

Prijašnje generacije vlakova za vuču koristile su neupravljive ispravljačke spojeve za pretvorbu izmjenične struje u istosmjernu. Takvi sustavi nisu mogli vraćati snagu u mrežu zbog korištenja neupravljivih ispravljača. Današnji **sustav kočenja vlaka** koristi upravljive ispravljače (usmjerivače) koji imaju sposobnost pretvaranja istosmjerne struje natrag u izmjeničnu odgovarajuće frekvencije i napona. Pretvorba izmjenične struje u istosmjernu odvija se tijekom motornog režima rada, dok se pretvorba istosmjerne u izmjeničnu odvija tijekom generatorskog režima. Takav način rada ispravljača važan je kod elektrodinamičkog kočenja vlaka. Elektrodinamičko kočenje (regenerativno kočenje) nastupa kada elektrovočno vozilo prijeđe iz vožnje u kočenje gdje elektromotori prijeđu iz motornog u generatorski način rada.

Vlak uzima iz jednofazne izmjenične mreže napon koji ispravlja i pretvara preko izmjenjivača u trofazni napon frekvencije od 50 Hz za pogon vučnih motora. Ispravljač i izmjenjivač povezani su preko istosmjernog međusklopa koji kontrolira razinu napona i napaja sustav za kočenje. Prilikom kočenja događa se obrnuti proces pretvorbe.

Današnji uređaji kao što su **frekventni pretvarači** koriste neupravljive ispravljače. U većini slučajeva takvi ispravljači ne sadrže transformatore. Razlog tome je cijena, težina i veličina samih transformatora. Njihovi ispravljači direktno su spojeni na izmjeničnu mrežu, a regulacija



Slika 1.17. Dijelovi frekventnog pretvarača priključenog na izmjenični motor

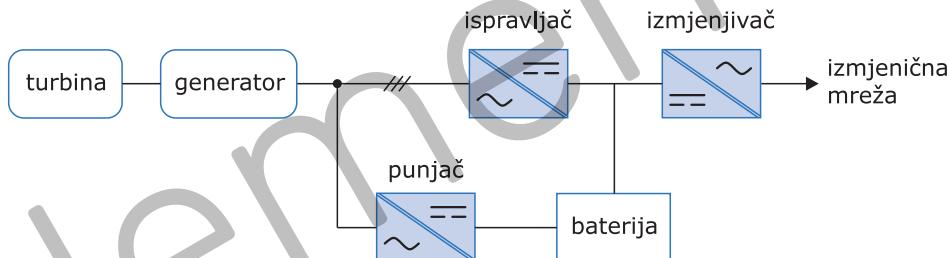
istosmjernog napona vrši se preko ulaznih i izlaznih filtera. Također, neki elektronički uređaji koriste stabilizator napona koji ima ulogu održavanja istosmjernog napona na točnom i stabilnom iznosu.



Slika 1.18. Ispravljački istosmjerni izvor napajanja

Osim frekventnih pretvarača energetski pretvarači imaju veliku primjenu i kod **izvora napajanja**. Njihovi ispravljači namijenjeni su za napajanje specifičnih istosmjernih trošila npr. u telekomunikacijama, energetskim i industrijskim postrojenjima s velikom izlaznom strujom i snagom, te za punjenje i održavanje stacionarnih akumulatorskih baterija. Primjenom izlaznog filtra smanjuje se valovitost izlaznog napona prema zahtjevima osjetljivih trošila i akumulatorskih baterija. Takvi ispravljači između ostalog mijere napon, struju i temperaturu priključene akumulatorske baterije, te vrše odgovarajuće zaštitne, regulacijske, ispitne ili signalne funkcije. Drugim riječima, ispravljači vode brigu o bateriji – da bude u ispravnom stanju, uvijek napunjena i spremna preuzeti napajanje priključenih trošila. Osim toga ispravljač može pružati zaštitu od povиenog ili snиenog napona punjenja, zaštitu od dubokog pražnjenja, signalizaciju poviшene temperature itd.

Vjetroelektrane koriste također energetske pretvarače u svom sustavu. Vjetroelektrane pretvaraju energiju vjetra u mehaničku energiju koja se potom pretvara u električnu energiju rotirajućim oštricama koje tvore propeler. Istosmjerni generator napon je jednostavan sustav za upravljanje. Pretvara mehaničku energiju u električnu. Međutim, problemi mogu nastati u kvaliteti i prijenosu snage. Energetska učinkovitost sustava vjetra može se značajno povećati korištenjem elektroničke opreme. U tom se slučaju napon sinkronog generatora šalje na ulaz ispravljača koji može biti upravlјiv ili neupravlјiv. Ispravljeni istosmjerni napon nadalje se šalje na ulaz izmjenjivača koji ga pretvara u izmjeničan oblik i šalje nazad u mrežu. Osim toga moguće je osigurati i punjenje baterija preko drugog ispravljača (punjača) ili mreže, kao što je to prikazano na slici 1.19.



Slika 1.19. Pojednostavljeni blok-dijagram sustava vjetroelektrane