



# Ekološko snovanje elektronskih naprav

## ENOTA 10: Močnostna elektrotehnika

Ime avtorja: Andrej Sarjaš

10.1. Močnostna elektrotehnika .....	2
10.2. Stikalni način delovanja .....	4
10.3. Elementi stikalnih pretvornikov.....	10
10.4. Stikalni pretvorniki .....	18



Vsebina poglavja:

- Principi pretvorbe moči
- Stikalni elementi močnostne elektronike
- Pretvorniki



## 10.1. Močnostna elektrotehnika

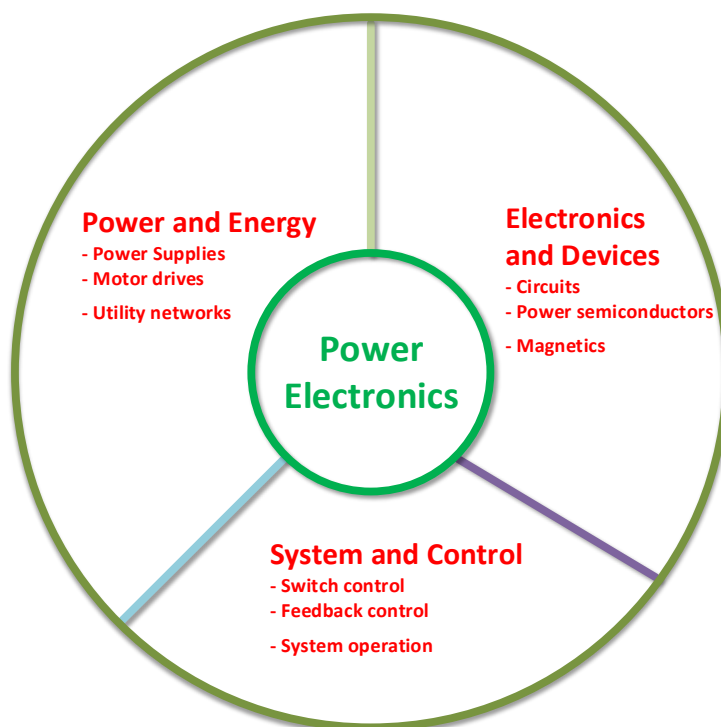
Močnostna elektrotehnika je področje elektrotehnike, ki se ukvarja s pretvorbo in shranjevanjem električne energije. Vsi elektronski aparati so napajani iz različnih virov. Ti viri so lahko avtonomni in prenosljivi ali stacionarni. Med avtonomne vire štejemo vse baterijske sisteme ter naprave, ki skrbijo za napajanje prenosnih in avtonomnih napravah. Na splošno, baterijski sistemi predstavljajo samo način shranjevanja energije, katero dovedem iz stacionarnih sistemov, kot je električno omrežje. Popolnoma avtonomni viri energije so sistemi, ki niso odvisni od energije električnega omrežja in na danem mestu skrbijo za pretvorbo neelektrične energije v električno. Med te štejmo različne sončne celice, vetrne elektrarne itd..

Lahko si postavimo vprašanje, kaj je pretvorba in nadzor električne energije? Energija je ključna potreba pri vsakem človeškem prizadevanju. Zmožljivosti in prilagodljivost sodobne elektronike je treba sprejeti, kot nove izzive za učinkovito rabo energije. Bistveno je razmisliti o tem, kako se elektronska vezja in sistemi lahko uporabijo za pretvorbo in upravljanje energije. Močnostna elektrotehnika vključuje preučevanje elektronskih vezij, ki so namenjena za nadzor in pretok električne energije. Ti tokokrogi upravljajo moči, ki so veliko višje od cene posamezne naprave. Usmerniki so verjetno najbolj znani primeri tokokrogov, ki ustrezajo tej definiciji. Pretvorniki je izraz za določen tip tokokrogov in sistemov, ki skrbijo za pretvorbo energije. Pretvornike klasificiramo glede na tip vhodne in izhodne električne energije. Tako poznamo AC-DC, DC-DC, DC-AC pretvornike in se najpogosteje uporabljajo za napajalne dele elektronskih naprav. Kot je prikazano na sliki 1., močnostna elektrotehnika predstavlja srednjo točko, kjer se energetske sistemi, klasična elektronika in krmilja združujejo. To je preprosto podkrepiti z dejstvom, da vsi mikrokrmilniški sistemi, logična digitalna vezja ali preprosta krmilja za svoje delovanje potrebujejo električno energijo. Električno energijo privedemo iz napajalne elektronike, ki je ključna domena močnostne elektrotehnike. Vsako vezje za prenos in pretvorbo energije mora obravnavati problematiko obeh vidikov tako nadzor, kakor tudi pretvorbo energije. Poglavitna področja močnostne elektrotehnike so preučevanje polprevodniških elementov, uporaba magnetnih naprav za shranjevanje energije, metode vodenja, ki so del današnjih energetskih sistemov. V kateri koli študiji elektrotehnike je pomen elektronike treba predstaviti iz vidika digitalno, analogno in radiofrekvenčno-RF elektroniko, ki odraža značilne metode in edinstvene izzive.

Aplikacije močnostne elektronike se eksponentno širijo. Ni mogoče zgraditi računalnikov, mobilnih telefonov, avtomobilov, letal, industrijskih procesov in številnih drugih vsakodnevnih izdelkov brez močnostne elektronike. Alternativni energetske sistemi, kot so vetrni generatorji, sončna energija, gorivne celice in drugi za svoje delovanje potrebujejo močnostno elektroniko. Napredek tehnologije, kot so električna in hibridna vozila, prenosni računalniki, mikrovalovne pečice, ravni zasloni, LED osvetlitev in na stotine drugih inovacij ni bilo mogoče izvesti, dokler napredek v



močnostni elektroniki ni omogočil njihove proizvodnje. Čeprav nihče ne more napovedati prihodnosti, je gotovo, da bo energetska elektronika v središču temeljnih energetskih inovacij.



Slika 1. Področja močnostne elektronike

Zgodovina močnostne elektronike je tesno povezana z napredkom v elektronskih komponent, ki zagotavljajo ravnanje z visokimi močmi. Od leta 1990 so komponente in naprave postale tako sofisticirane, da se je pričel prehod iz področja fizične naprave na področje programske aplikacije. Ta prehod je temeljil na dveh dejavnikih:

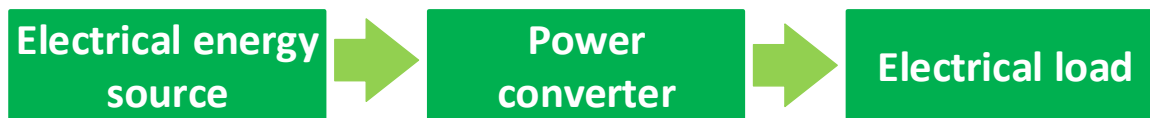
- Za skoraj vsako aplikacijo obstajajo napredni polprevodniki z ustreznimi močmi in so široko dostopni.
- Splošen pritisk k miniaturizaciji komponent narašča s številom električnih naprav in proizvodov.

Čeprav se naprave še naprej izboljšujejo, njihov razvoj sledi inovativnim aplikacijam in napravam.

Vsa električna elektronska vezja uravnavajo pretok električne energije med električnim virom in bremenom. Komponente v tokokrogu morajo usmerjati električne tokove, ne pa jih ovirati. Splošni sistem pretvorbe moči je prikazan na sliki 2. Funkcija pretvornika moči, prikazan v sredini slike 2., je nadzor pretoka energije med izvorom in bremenom. V našem primeru se bo pretvorba moči izvajala z električnim elektronskim vezjem.



Ker je med virom in bremenom pretvornik moči, se vsa porabljena energija v pretvorniku porazdeli na vse komponente znotraj pretvornika. Pojavi se ključen izziv. Za izgradnjo pretvornika je potrebno uporabiti komponente brez ali z nizkimi izgubami. Želeno je, da bi se učinkovitost pretvornika bližala proti 100%.



Slika 2. Pretvorba električne energije

Pretvornik moči, ki je povezan med virom in obremenitvijo, vpliva tudi na zanesljivost sistema. Če je vir energije povsem zanesljiv, pri čemer lahko nezanesljiv pretvornik vpliva na breme. Nezanesljiv pretvornik se na bremenu kaže, kot nezanesljiv napajalni vir. Prav tako nezanesljiv pretvornik moči povzroča nezanesljivost celotnega sistema. Če pogledamo to iz perspektive vira, lahko trdimo, da povprečno evropsko gospodinjstvo doživi izpad električnega omrežja le nekaj minut na leto. Energija je na voljo 99.9% časa. Pretvornik energije mora biti zanesljiv, saj le tako se lahko prepreči degradacija sistema. Izvedba idealnega pretvornika ne sme povzročati nobenih težav v življenjski dobi naprave. Visoka zanesljivost je lahko težji inženirski izziv, kot visoka učinkovitost pretvornika. Iz stališča ekološke zasnove električne naprave, so pretvorniki energije en izmed temeljev za zanesljivo delovanje in učinkovitost naprave. Učinkovitost pretvornika vpliva tako na življenjski cikel naprave, ki je pomembna metodologija za ocenjevanje ekološke učinkovitosti naprave.

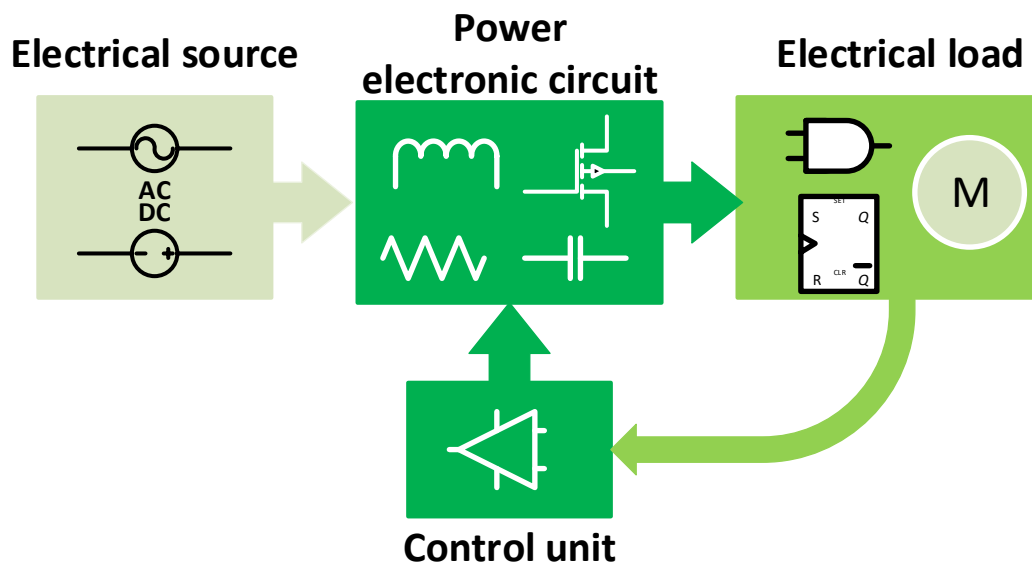
## 10.2. Stikalni način delovanja

Delovanje stikalnih pretvornikov temelji na nizko izgubnih stikalih, kar močnostni elektroniki postavlja ekstremne zahteve. V idealnem primeru, ko je stikalo vklopljeno, ima ničelni padec napetosti in bo tako preneslo celotno energijo na breme brez dodatnih izgub. Ko je stikalo izklopljeno, ima neskončno upornost, kar pomeni, da čez stikalo ne teče noben tok. Moč stikala je produkt napetosti in toka, kar pomeni, da je želen produkt obeh veličin enak nič. Če je moč enaka nič pomeni, da v pretečenem času nimamo porabe energije na stikalnem elementu. Stikalo torej uravnava pretok energije brez izgube, kjer je zanesljivost stikala ključnega pomena. Gospodinjska mehanska stikala opravijo v enem desetletju morda več, kot 100.000 preklopov. Na žalost mehansko stikalo ne ustreza vsem praktičnim potrebam. Elektronska stikala, ki so del napajalnega vezja lahko preklopijo tudi do 100.000 krat v eni sekundi. Tudi najboljša mehanska stikala ne bodo zdržale več, kot milijonov ciklov. Zato se v pretvornikih uporabljajo polprevodniška stikala izbranih moči.



Celoten koncept pretvorniškega sistema je prikazan na sliki 3. Pretvorniški sistem sestavljajo štiri ločene enote. Te so:

- energijski vir,
- močnostno vezje pretvornika,
- enota za vodenje pretvornika,
- breme.



Slika 3. Pretvorniški sistem

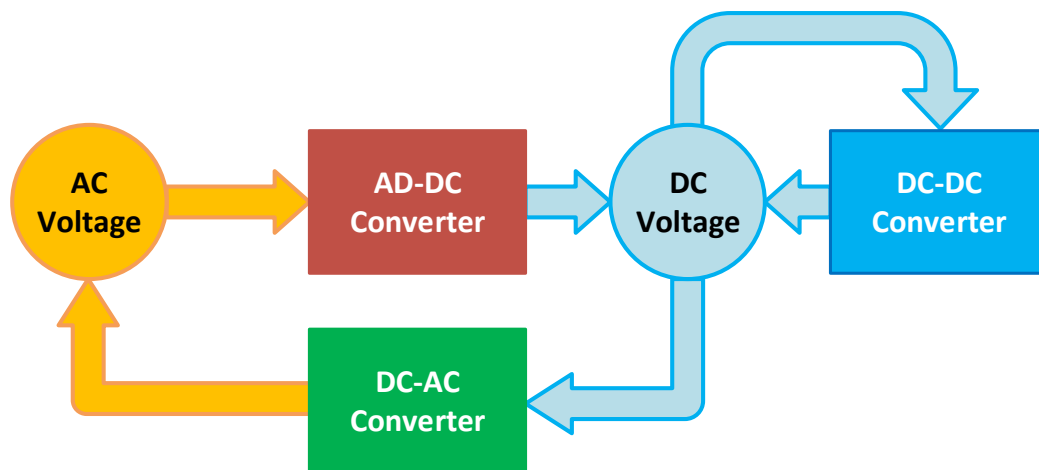
Energijski vir pri elektronski napravi lahko predstavlja omrežna napetost, baterija ali drugi alternativni vir. Močnostno vezje se razlikujejo glede na tip pretvornika. Tip pretvornika se loči glede na vhodno in izhodno napetost, slika 4.

Tako ločimo pretvornike, ki pretvorijo izmenično napetost v eno smerno (AC-DC 'Alternate Current to Direct Current'). Tip AC-DC pretvornik je pogosto uporabljen pri elektronskih vezjih, ki se napajajo iz električnega omrežja in za svoje delovanje potrebujejo enosmerno napetost (logična vezja, enosmerna analogna vezja, mikrokrmilniški - računalniški sistemi itd.). AC-DC pretvornik imenujemo tudi usmernik.

Imamo pretvornike tipa DC-DC ('Direct Current to Direct Current'). Ti služijo za zviševanje ali zniževanje enosmerne napetosti. Elektronska vezja in vgrajeni elementi za svoje delovanje potrebujejo različne napetostne potenciale. Z vgradnjo DC-DC pretvornikov uskladimo napetostne potenciale v elektronskem vezju (najpogostejši napetostni potenciali 12V, 3.3V, 5V).

Zadnji tip pretvornika so DC-AC ('Direct Current to Alternate Current'). Ti pretvorniki se imenujejo tudi razsmerniki in služijo za pretvorbo enosmerne napetosti v izmenično. Pogosto se uporabljajo pri pogonu izmeničnih električnih motorjev z nastavljivo hitrostjo ter pretvorbo energije iz alternativnih virov, kot so na primer sončne elektrarne.





Slika 4. Tipi pretvorniških sistemov.

Kontrolna enota pretvornika je lahko izvedena v obliki analognega vezja ali s pomočjo mikrokontrolerja. Kontrolna enota skrbi za vodenje polprevodniških stikal, glede na želen izhod pretvornika. Izhod pretvornika je lahko napetostni nivo, fazni pomik ali frekvenca periodičnega signala. Tip bremena na pretvorniku pogojuje delovanje pretvornika ter njegovo vodenje. Na primer poznamo induktivna, kapacitivna bremena, ki povzročata napetostne ali tokovne špice ter preprosta omska bremena, ki nimajo izrazitega prehodnega pojava. Pogosto se srečujemo z mešanimi bremenami, ki imajo tako upornost, induktivnost kot tudi kapacitivnost. Poznana induktivna bremena so motorji, releji in močnostni kontaktorji. Vsi elementi pretvornika so zasnovani tako, da imajo čim nižje energijske izgube.

Preklopne naprave se izberejo glede na svojo zmogljivost in želen prenos energije, ki se poda, kot produkt toka in napetosti. To je v nasprotju z drugimi aplikacijami elektronike, pri katerih se ponavadi podaja izgubna moč. Na primer, tipični stereo sprejemnik izvede pretvorbo vhodne izmenične napetosti v avdio izhod. Večina avdio ojačevalcev ne uporablja tehnik močnostne elektronike, kjer bi polprevodniške komponente delovale, kot stikala. Komercialni 100W ojačevalnik je običajno zasnovan s tranzistorji, ki so dovolj veliki, da prenesejo 100W moči. Polprevodniške naprave se uporabljajo predvsem za rekonstrukcijo avdio signala, ne pa za manipulacijo energetskega toka. Pri tem so energetske izgube velike. Domači kino ojačevalnik deluje z izkoristkom, ki je nižji od 10%. V nasprotju s takšno vrsto ojačevalnikov obstajajo ojačevalniki, ki za pretvorbo moči uporabljajo tehnike močnostne elektronike. Ti zagotavljajo visoke izkoristke. Sistem za domači kino, ki se izvaja s preklopnimi ojačevalniki, lahko preseže celo 90% energetske učinkovitosti in je manjših dimenzij. Pogosto takšen tip ojačevalnika ne potrebuje dodatnih hladilnih teles in so integrirani v enem čipu. Ojačevalniki so lahko celo vgrajeni direktno zvočnike.

Stikalni pretvorniki dosegajo velike moči in so mehansko relativno majhni. Navedimo dva primera.

Stikalo NTP30N20 je metal-oksidni tranzistor z dovoljenim tokom 30A in napetostjo 200V. Maksimalna dovoljena moč disipacije na stikalu je 200W s primernim



hladilnim sistemom (hladilno rebro ali ventilator) ali 2,5 W brez hlajenja. Po teoriji močnostne elektronike je nazivna moč  $30 \text{ A} \times 200\text{V} = 6 \text{ kW}$  dovedene energije iz vira do uporabnika. Ker NTP30N20 deluje v stikalnem načinu, kar pomeni da je popolnoma odprto ali zaprto. Disipacija moči je relativno nizka in se pojavi v največji meri v času preklopa.

Mnogi proizvajalci NTP30N20 uporabljajo za vodenje različnih gospodinjstkih aparatov kot so: hladilniki, klimatske naprave in druga industrijska orodja. Kot smo omenili so dovedene energije preko stikala bistveno višje, kot dovoljena energija na samem stikalu. Kot smo že omenili je stikalo primerno za dovedeno moč do 6kW in lastno največjo močjo 200W. Razmerje je moči je 30:1, kar je relativno visoko, vendar ne nenavadno v kontekstih močnostne elektronike. Če primerjamo prej naveden primer avdio ojačevalnika, ki ne deluje v stikalnem načinu mora biti zagotovljeno, da je dovedena moč skoraj enaka ali celo večja, kot moč lastne disipacije tranzistorja.

Če pogledamo še drugi primer, IRG6S60B120KD je bipolarni tranzistor z izoliranimi vrati (IGBT- 'Insulated-gate bipolar transistor'), ki je bil namensko razvit posebej za močnostno elektroniko in stikalni režim delovanja. Njegove nazivne vrednosti so 1200V in 120A. Njegova dovedena moč znaša torej 144kW, ta zadostuje za nadzor električnega ali hibridnega avtomobila. Pri čemer je zanimivo poudariti, da njegova lastna disipacija znaša le 500W, kar je v razmerju 288:1 glede na dovedeno moč.

Močnostne aplikacije pripeljejo do zanimivih vprašanja ter izzivov. V pretvornikih kateri poglavitni del predstavljajo nizko izgubna polprevodniška stikala pogosto manipulirajo s 30-kratno zmogljivostjo disipacije moči, kar pomeni, da imamo le okrog 3% izgub. Majhna napaka v načrtovanju, kar lahko povzroči nepričakovane toplotne izgube ali manjša sprememba v postavitvi elementov lahko drastično zniža učinkovitost pretvornika. Na primer, če se izkaže, da so izgube 4% namesto 3%, je napetost na napravi 33% višja, kar posledično lahko pomeni okvaro ali napako naprave. Snovanje močnostnih pretvornikov lahko opredelimo s tremi poglavitnimi izzivi.

- Prvi izziv je zanesljivost močnostnih elektronskih vezjih. Pri tem je potrebno striktno upoštevati nazivne napetosti, tokove ter oddano moč naprave. Moči morajo vedno ostati znotraj mejnih vrednosti. Še posebej je to pomembno pri upravljanju visokih moči.
- Drugi izziv je preprostost vezja. Pri elektronskih vezjih je znano, čim več elementov vsebuje tem večja je možnost napake ali okvare celotnega sistema. Močnostna elektronska vezja imajo ponavadi nekaj delov, zlasti v glavni energijski veji. Za doseganje učinkovitosti pretvornika je zelo pomembna, da smotrno izbiramo glavne komponente. To pogosto pomeni, da sofisticirane strategije vodenja implementiramo s preprostimi elektronskimi vezji.
- Tretji izziv je integracija. En izmed načinov, kako se izogniti kompromisu zanesljivosti in kompleksnosti je integracija večih komponent in funkcij na en sam substrat. Na primer, mikroprocesor lahko vsebuje milijone vrat.





Vse medsebojne povezave in signali tečejo znotraj enega čipa, zanesljivost pa je odvisna enega samega dela. Pomemben trend v močnostnih elektroniki je razvoj integriranih modulov. Proizvajalci iščejo načine, kako integrirati čim več pomembnih komponent v en sam modul. Miniaturizacija komponent prinaša nove izzive. Mnogi polprevodniški elementi vključujejo majhne vezne žice, ki so lahko občutljive na toplotne ali vibracijske poškodbe. Majhne geometrije prav tako povečujejo elektromagnetne motnje med notranjimi komponentami.

Dva različna trenda poganjata razvoj močnostne elektronike. Na enem koncu imamo visoko zmogljive mikroprocesorje, pomnilniške čipe in druga napredna digitalna vezja, ki povečujejo zmogljivosti pretvornikov pri zelo nizki napetosti. Pri tem lahko izpostavimo napajanje zmogljivih procesorjev, kjer so tokovne zahteve 100A pri samo 1V. Prav tako pri takšnih sistemih imamo opravka s spremenljivim bremenom in časovnimi zahtevami v mikro ali nanosekundah. Na drugi strani imamo veliko prenosnih naprav, ki se napajajo iz različnih tipov polnilnih baterij. Napajalniki za takšne naprave morajo biti učinkoviti in poceni. Trenutno imajo napajalniki in polnilci pri takšnih napravah relativno visoke izgube ter nizek izkoristek. Zato so današnje zahteve in trud usmerjene v izboljšanje učinkovitosti ter manjši porabi energije. Standardi učinkovitosti, kot je na primer program EnergyStar, postavljajo vse strožje zahteve za širok spekter nizkonapetostnih napajalnikov.

V preteklosti so bili 'linearni' napajalniki izdelani s transformatorji in usmerniki, ki so pretvorili AC napetost v DC. V poznih šestdesetih letih je uporaba enosmernih virov v letalski in vesoljski industriji privedla do razvoja močnostnih stikalnih elektronskih pretvornikov. V dobro zasnovanem stikalnem pretvorniku, je izmenični napetostni vir iz omrežja usmerjen brez direktne transformacije, kot to počnejo linearni pretvorniki. Nastalo visoko enosmerno napetost pretvorimo s DC-DC pretvornikom na predpisan napetostni nivo. Osebni računalnik pogosto zahteva več nivojev napajanja 3.3V, 5V, 12V ter za procesor 1V. Le stikalni pretvorniki lahko zagotovijo več nivojev napetosti.

Zelo zanimiva je primerjava zveznih in stikalnih pretvornikov. Stikalni pretvorniki napram linearnih veljajo za naprave z veliko učinkovitostjo, malih dimenzij in velike moči. Prav tako ne potrebujejo kompleksnega hladilnega sistema. Toda naprave so kompleksnejše od linearnih prav tako povzročajo valovitost izhodne napetosti, kar onemogoča uporabo pri nekaterih preciznih aplikacijah. Linearnih pretvorniki se, danes najpogosteje uporabljajo za male moči, kot stabilizatorji različnih elektronskih komponent. Naštejmo nekaj lastnosti obeh skupin.

- **Linearni DC napajalniki:** So bili v široki uporabi vse do poznih 1970-ih. Z napredovanjem tehnologije preklopnih napajalnikov so linearni napajalniki danes manj priljubljeni, vendar se še vedno uporabljajo v aplikacijah, ki zahtevajo ne valovito in stabilno izhodno napetost. Linearni napajalnik uporablja velik transformator za transformacijo visoke AC napetosti v nizko AC napetost. Za transformatorjem sledi usmerjevalno vezje ter različni





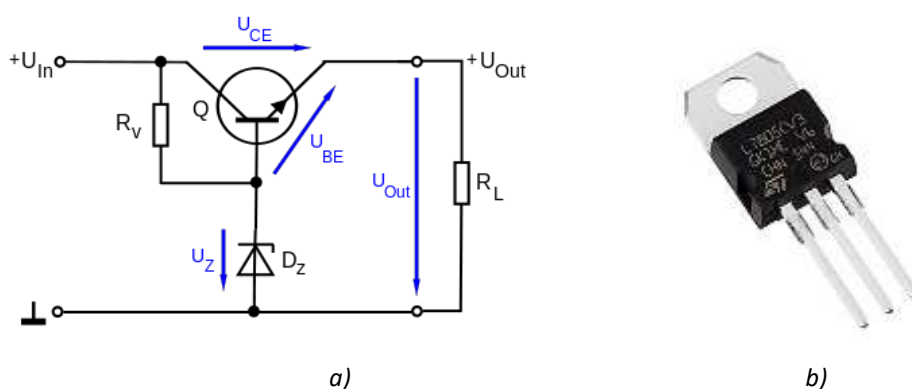
filtri, ki poskrbijo za nizko valovno DC napetost. Nizka enosmerna napetost se nato regulira na želen nivo s pomočjo napetostnih stabilizatorjev. Tipične aplikacije linearnih napajalnih sistemov so:

- a) Audi tehnika, studijski mikserji.
- b) Nizko šumni ojačevalniki.
- c) Procesiranje signalov.
- d) Zajemanje podatkov z ADC pretvorniki.
- e) Zaprto-zančno vodenje.
- f) Precizna laboratorijska oprema.

- **Stikalni DC napajalniki:** So bili prvič uvedeni v poznih sedemdesetih letih, danes pa so zaradi svoje izjemne energetske učinkovitosti najbolj priljubljena oblika DC napajalnikov na trgu. Stikalni usmernik uravnava izhodno napetost s pomočjo pulzno širinske modulacije-PWM (PWM – 'Pulse width modulation'). Tehnika PWM ustvarja nekaj visokih frekvenčnih motenj, vendar omogoča, da se električna napetost za napajanje proizvede z zelo visoko učinkovitostjo moči. Z dobro zasnovano lahko ima stikalna napetost odlično regulacijo motenj ter obremenitev linije. Tipične aplikacije za stikalne DC napajalnike so:

- a) Visoko napetostne in tokovne aplikacije.
- b) Mobilne in komunikacijske naprave.
- c) Polnjenje baterij za različne naprave in vozila.
- d) Enosmerni motorji

Slika 5., predstavlja 5V DC-DC linearni napetostni pretvornik.



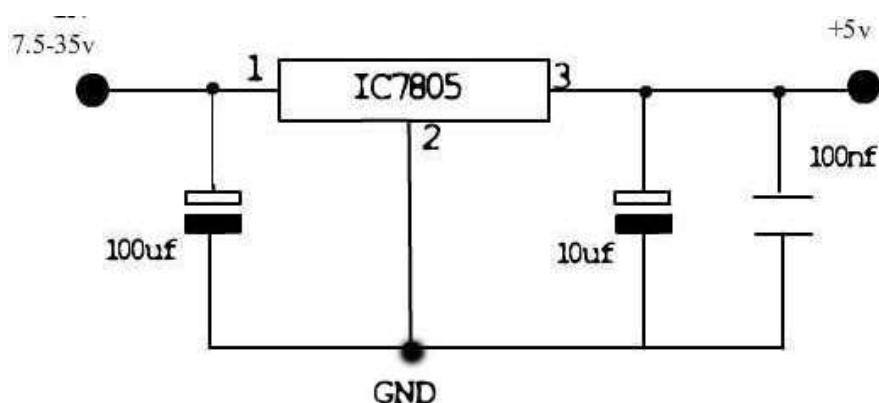
Slika 5. a) Shema linearnega napetostnega pretvornika, b) Izdelava 5V pretvornika v ohišju TO-220.

Iz slike 5 je razvidno, da zenerjeva dioda skrbi za stabilizacijo izhodne napetosti, kar pomeni, da se višek napetosti troši na upor  $R_V$ .

To je poglavitni razlog segrevanja pretvornika, ki za svoje zanesljivo delovanje pri višjih tokovih in višji vhodni napetosti pogosto potrebuje ustrezno hlajenje. Na primer



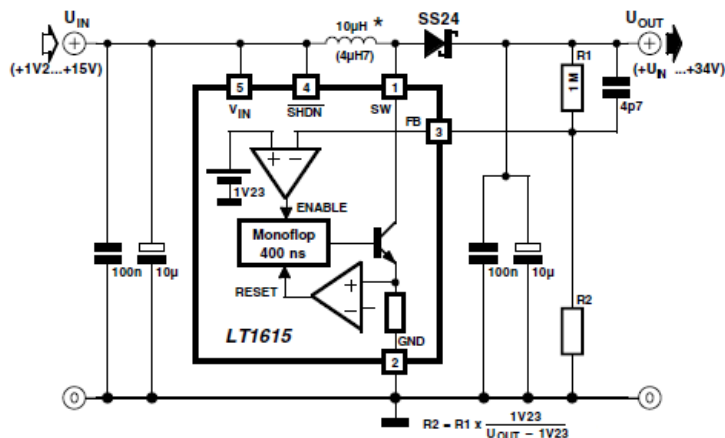
če želimo stabilno napajanje 5V pri baterijskem napajanju 12V, se bo razlika napetosti 7V trošila na uporu  $R_v$ . Vežalna shema napetostnega regulatorja prikazuje slika 6.



Slika 6. Vežalna shema linearnega napetostnega pretvornika.

dg

Slika 7. prikazuje stikalni DC-DC pretvornik.



a)



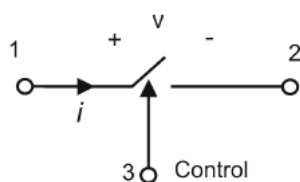
b)

Slika 7. a) Shema stikalnega DC-DC pretvornika, b) Fizični izgled DC-DC pretvornika.

### 10.3. Elementi stikalnih pretvornikov

Elektronska stikala, ki so sposobna voditi visoke napetosti, tokove v visokofrekvenčnem področju, so najpomembnejši elementi potrebni pri oblikovanju sistemov za pretvorbo energije. Poraja se vprašanje, kaj je idealno stikalo? Idealno elektronsko stikalo si lahko predstavljamo, kot napravo treh priključkov, slika 8.





Slika 8. Idealno stikalo.

Kjer imamo vhodno, izhodno in krmilno sponko. Krmilni priključek krmili stikalo v stanje odprto/zaprto (ON/OFF). Idealno stikalo pomeni, da v odprtem stanju nima upornosti v zaprtem stanju ima neskončno upornost. Idealno stikalo spremeni stanje takoj, kar pomeni, da je potrebno ničelni čas, da preklopi iz ON-v-OFF ali OFF-v-ON. Dejanska stikala imajo svoje omejitve pri vseh značilnostih, ki smo jih navedli pri idealnem stikalu. Na primer, ko je stikalo vključeno imamo na njem padec napetosti, kar pomeni, da ima določeno upornost. V času izklopa lahko prepušča določen tok, kar pomeni, da nima neskončne upornosti. Prav tako čas preklopa ni neskončno hiter. Kot posledica navedenih neidealnih karakteristik stikala, je v vsakem trenutku na stikalu prisotna napetost in tok, kar ima za posledico dve vrsti izgub. Prva vrsta izgub nastane med vklopom in izklopom in jih opredelimo, kot preklonke izgube. Druga kategorija izgub so posledica lastne upornosti stikala, ki nastanejo v času odprtja ali zaprtja. Te izgube imenujemo tudi prevajalne in zaporne ('transfer and leaking losses') izgube.

Koncept idealnega stikala je pomemben pri ocenjevanju tokokrogov. Predpostavke o ničelnem padcu napetosti, tokovnega puščanja in preklonkih pojavov olajšajo simulacijo in modeliranje obnašanja različnih pretvorniških sistemov. Glede na lastnostmi idealnega stikala obstajata trije razredi močnostnih stikal.

**Nenadzorovano stikalo:** Stikalo nima kontrolnega priključka. Stanje stikala se določi z zunanjo napetostjo ali trenutnimi pogoji vezja, v katerem se stikalo nahaja. Primer takšnega stikala je dioda.

**Pol-nadzorovano stikalo:** V tem primeru ima oblikovalec vezja omejen nadzor nad stikalom. Na primer, stikalo se lahko vklopi s kontrolnim priključkom, vendar, ko je sklenjeno ga ni mogoče razkleniti s pomočjo krmilnega signala. Stikalo se lahko izklopi glede na trenutno stanje vezja ali z dodano krmilno elektroniko, ki stikalo prisil v izklop. Primer takega stikala je tiristor.

**Popolnoma nadzorovano stikalo:** Stikalo se lahko vklopi in izklopi prek krmilnega priključka. Primeri takšnih stikal so bipolarni tranzistor BJT, MOSFET tranzistor in IGBT tranzistor.

### 10.3.1 Nenadzorovano stikalo

Dioda je znana tudi kot usmerjevalnik in je nenadzorovano stikalo. Gre za element z dvema priključkoma, slika 9. Priključka sta znana, kot anoda (A) in katoda (K). V

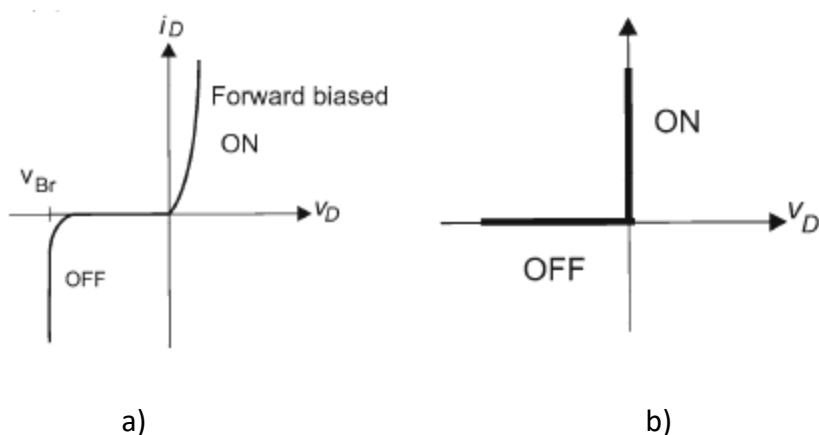


idealnem primeru je diodni tok ( $i_D$ ) enosmerni, kar pomeni da tok lahko teče samo iz anode proti katodi.



Slika 9. Simbol polprevodniške diode ter polprevodniška struktura.

Diodna napetost  $V_D$  se meri, kot napetost med anodo in katodo. U-I karakteristike diode prikazuje slika 10. V prvem kvadrantu je dioda v odprtem stanju, kar pomeni, da prevaja. Na diodi imamo majhen padec napetosti, ki je odvisen od tipa polprevodnika iz katerega je dioda narejena. Padec napetosti na silicijeva diodi znaša okrog 0.7V pri germanijevi diodi okrog 0.3V. Tok dioda se eksponentno spreminja z napetostjo diode. V tretjem kvadrantu U-I karakteristike dioda deluje zaporno, kar pomeni, da skozi diodo ne teče minimalni tok, ki ga imenujemo tok puščanja. Idealna karakteristika diode je prikazana na sliki 10. b).

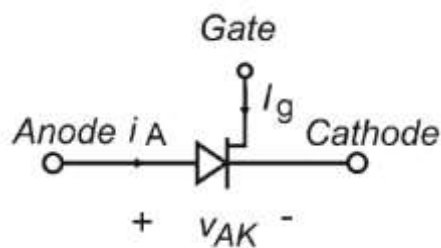


Slika 10. U-I karakteristika diode: a) realna, b) idealna.

### 10.3.2 Pol-nadzorovano stikalo

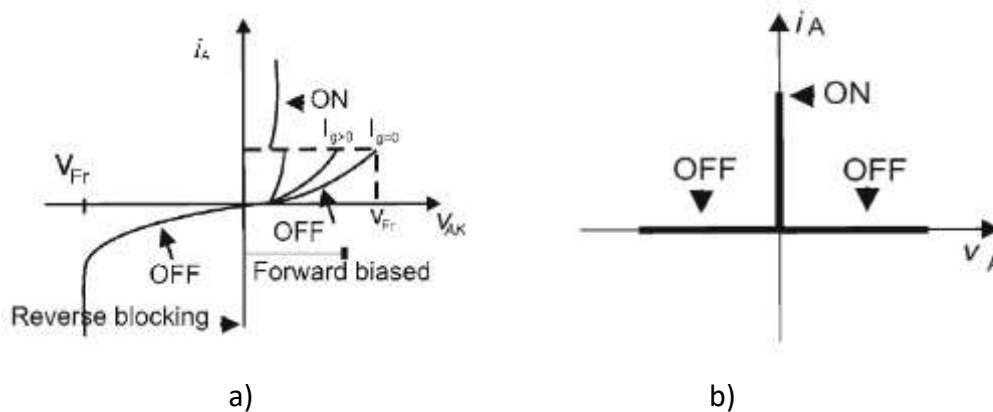
Tiristor ali SCR je polprevodniško stikalo, katerega odprtje je lahko aktivirano s krmilno sponko Gate. Ko se stikalo vklopi, ga ni možno izključiti preko krmilne sponke in tiristor se obnaša podobno kot dioda. Tako tiristor uvrščamo v pol-nadzorovana stikalo. Slika 11. prikazuje simbol za tiristor. Čeprav obstajajo nekatere podobnosti med tiristorjem in diodo, tiristor deluje drugače. Tiristorski tok teče od anode k katodi in tiristorska napetost  $U_{AK}$  je pozitivna, kar prikazuje U-I karakteristika slika 12. a).





Slika11. Simbol tiristorja.

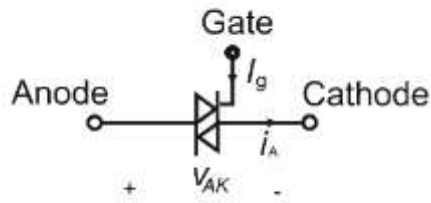
V kvadrantu ena je razvidno, da brez toka skozi krmilni priključek tiristor ne prevaja. V primeru, da steče tok skozi krmilni priključek, tiristor prične prevajati in ima zelo podobno karakteristiko, kot navadna dioda. V kvadrantu tri, tiristor ne prevaja, kar pomeni, da je v zaporni smeri. Tudi tukaj ima tiristor podobno karakteristiko, kot dioda. Čeprav je karakteristika tiristorja podobna, kot pri diodi je pri stikalnih karakteristikah razvidno, da tiristor prenese v zaporni smeri dosti višje napetosti. Visoka zaporna napetost je pomembna za različne močnostne sisteme, kot so AC-AC pretvorniki.



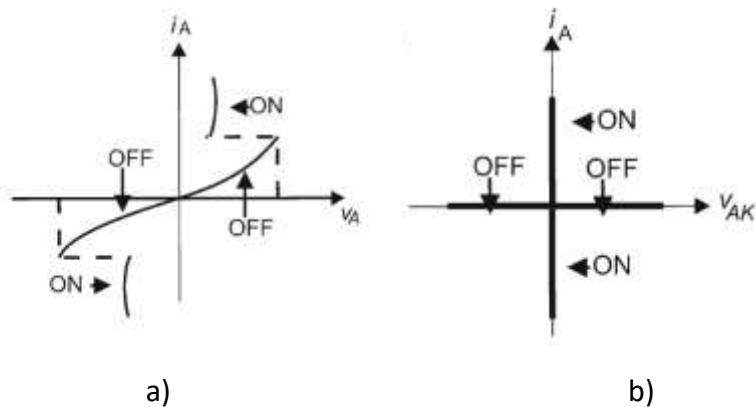
Slika12. U-I karakteristika tiristorja: a) realna, b) idealna.

Iz karakteristike tiristorja slika 12, je razvidno, da tok lahko teče le v eni smeri. Prav podobno poznamo element, ki je prav tako pol-nadzorovano stikalo le, da tok lahko teče v obe smeri. Ta element si imenuje triak, slika 13. Triak lahko predstavimo, kot dva tiristorja, ki sta vezana v povratni smeri. U-I karakteristika triaka je predstavljena na sliki 14. S kontrolnim priključkom triaka lahko nadziramo simetrični preklon v pozitivni in negativni polperiodi vhodnega signala. Triak se v glavnem uporablja za prenos nizkih moči kot so; vodenje enofaznega motorja, sistem za zatemnitev luči itd..





Slika12. Simbol triaka.

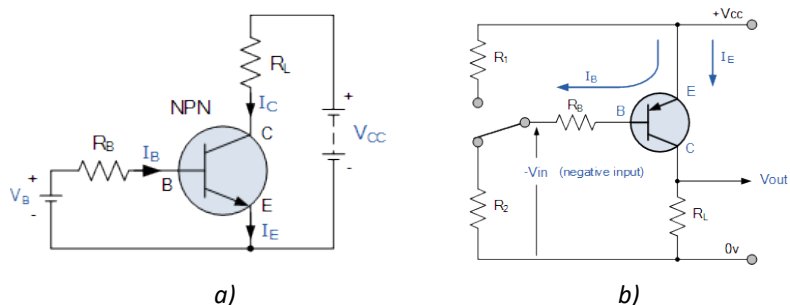


Slika13. U-I karakteristika triaka: a) realna, b) idealna.

### 10.3.3 Popolnoma nadzorovana stikala

Pri popolnoma nadzorovanem stikalu se lahko stanji odprto/zaprto aktivirajo preko kontrolnega priključka. Kratek opis vsake naprave je podan v naslednjih točkah.

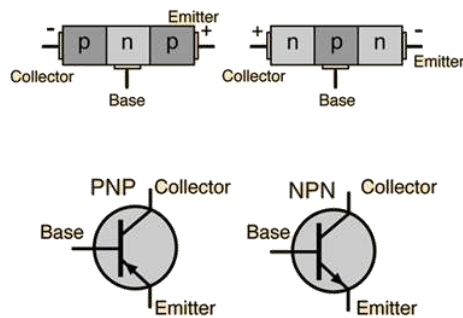
Bipolarni tranzistor –BJT ('Bipolar junction transistor') je popolnoma nadzorovano stikalo, kjer odprtost stikala krmilimo z baznim priključkom (B), slika 14 (a). Pri NPN tipu tranzistorja odprtost tranzistorja krmilimo s pozitivno bazno napetostjo. Tok skozi tranzistor teče od kolektorja (C) proti emitorju (E) v nasprotni smeri je tranzistor neprevoden. Pri PNP tipu odprtost tranzistorja krmilimo z negativno bazno napetostjo, kjer tok teče od emitorja proti kolektorju.



Slika 14. Simbol tranzistorja: a) NPN tip, b) PNP tip.

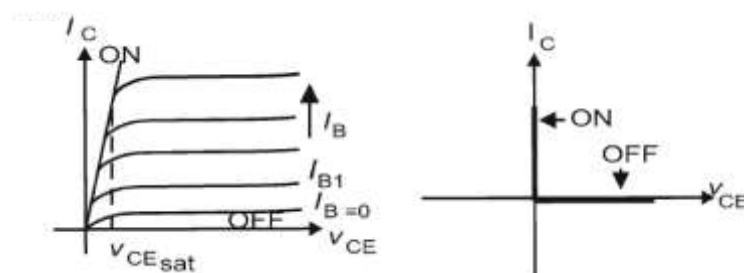


Notranja struktura tranzistorja je prikazana na sliki 15.



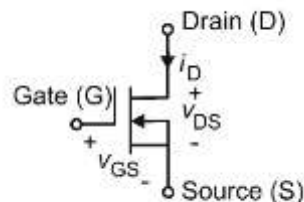
Slika 15. Struktura tranzistorja.

Iz statične karakteristike NPN tranzistorja slika 16(a) lahko vidimo, da ima element tri področja delovanja. V dveh področjih deluje, kot stikalo in v tretjem deluje, kot linearni ojačevalnik. Stikalo je zaprto, ko je vrednost baznega toka  $I_B=0$  in odprto, ko je napetost med kolektorjem in emitorjem  $V_{CE}$  manjša od  $V_{CEsat}$ . Če pogledamo idealno karakteristiko slika 15(b), pomeni, da v odprtem stanju tranzistor med (C) in (E) prepušča tok  $I_C>0$  pri  $V_{CE}=0$ . V zaprtem stanju je  $I_C=0$  in  $V_{CE}>0$ . Za prenos velikih moči se namesto tranzistorja uporabljajo IGBT tranzistorji.



Slika 16. Statična karakteristika tranzistorja: a) realna, b) idealna.

MOSFET tranzistor. MOSFET ('Metal Oxide Semiconductor Fieal Effect Transistor') tranzistor je dobil imel po principu delovanja, slika 17. Podobno, kot pri tranzistorju imam tri priključke (G),(D) in (S).

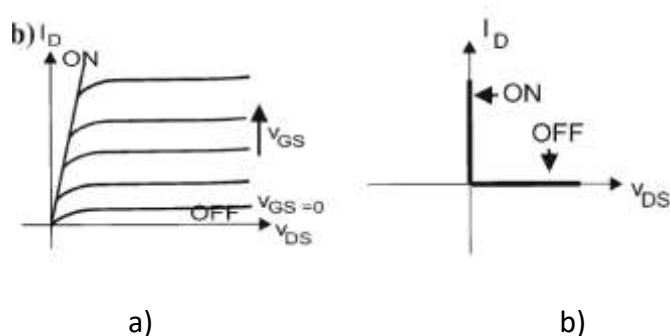


Slika 17. Simbol MOSFET tranzistorja.



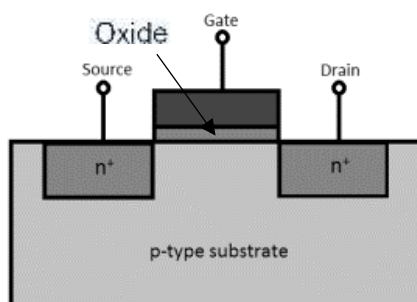


Odprtost kanala se krmili preko priključka (G) za svoje delovanje izkorišča električno polje med nasprotno polariziranim substratom. Električno polje vodimo z napetostjo  $V_{GS}$ , kar povzroči odprtost kanala med priključkoma (D) in (S). Zaradi tanke plasti silicijevega dioksida  $SiO_2$  med kanalom in vrati ima veliko vhodno upornost. Zaradi velike vhodne upornosti ter zelo nizke upornosti  $R_{DS}$  v času prevajanja je primeren element za močnostno elektroniko ter stikalno delovanje. Odpiranje prevodnega kanala s pomočjo električnega polja omogoča prenos visokih tokov. Prav tako je potrebno poudariti, da je bipolarni tranzistor tokovno voden element s tokom  $I_B$ . MOSFET tranzistorji so napetostno vodeni elementi z napetostjo  $V_{GD}$ . Statična karakteristika MOSFET je zelo podobna bipolarnemu tranzistorju, slika 18.



Slika 18. Statična karakteristika MOSFET-a: a) realna, b) idealna.

Struktura MOSFET tranzistorja.



Slika 19. Struktura MOSFET tranzistorja.

Če primerjamo sliki 15 in 19 lahko vidimo, da je struktura MOSFET bistveno drugačna od BJT tranzistorja. Pri MOSFET-u tvorimo prevodni kanal z dovajanjem napetosti  $V_{GD}$  med (G) in (D). Napetosti  $V_{GD}$  tvori električno polje, ki ustvari prevodni  $n^+$  kanala med dvema vgrajenima  $n^+$  substratoma znotraj p substrata. Čim višja je napetost tem širši je kanal, kar pomeni tem nižja upornost kanala. Pri stikalnem delovanju uporabljamo način popolnoma odprt ali zaprt.

Slabost MOSFET-a je velika napetostna občutljivost na vhodnih vratih (G), ki je posledica velike vhodne upornosti. Zato je pri načrtovanju potrebno paziti na velikost napetosti  $V_{GD}$ . Nekateri MOSFET-i imajo za ta namen vgrajeno zaščitno diodi. Slabost MOSFET ja tudi relativno velika kapacitivnost, kar omejuje uporabo pri visokih frekvencah. Za ta namen so bile razvite verzije, ki uporabljajo dva (G) priključka. Na ta

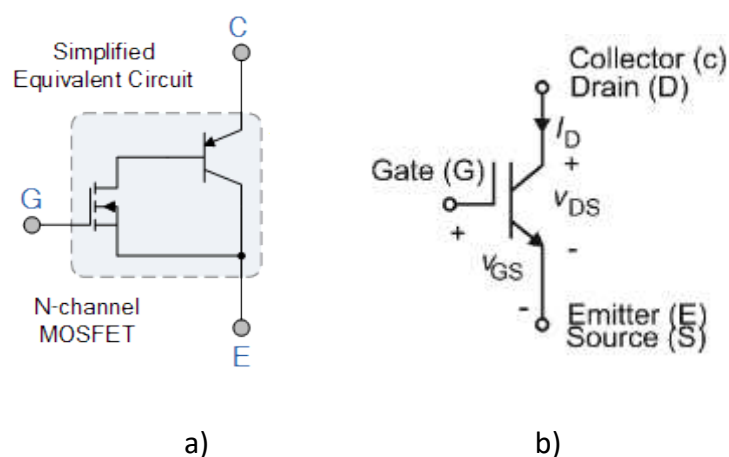


način mehansko zmanjšamo površino spoja. Dobre lastnosti MOSFETA so; zelo majhne dimenzije za velike moči, visoka preklopna hitrost, odporni na termično obremenitve. Table 1. prikazuje razliko med bipolarnim in MOSFET tranzistorjem.

Property	BJT	MOSFET
Input resistance	low	high
Control	Current (need power)	Voltage (no power)
Switching 'ON' time	50-500ns	5-500ns
Switching 'OFF' time	400-2400ns	5-500ns
Frequency	80MHz	1.5GHz
Conduction resistance	0.3Ω	0.01-1Ω
Overload sensitivity	bad	good
Thermal stability	Need	No need

Tabela 1. Primerjava bipolarnega in MOSFET tranzistorja.

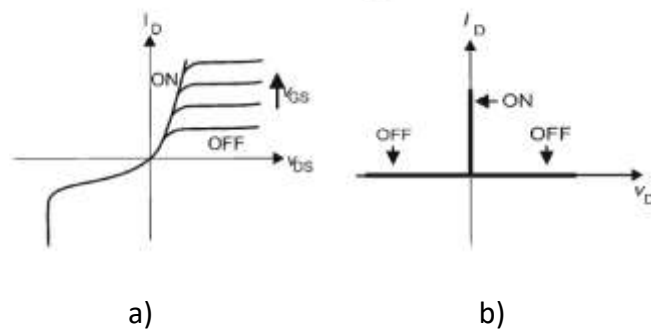
IGBT tranzistor je hibrid med BJT in MOSFET tranzistorjem. Tako IGBT združuje dobre lastnosti MOSFETA, to so hitri preklopi ter nizko prevodno upornost BJT tranzistorja. IGBT tranzistor je darlingtonova vezava MOSFET-a ter BJT tranzistorja, slika 20 (a). MOSFET krmili bazni tok v BJT tranzistor.



Slika 20. IGBT tranzistor.

Simbol IGBT tranzistorja je sestavljen iz MOSFET-a ter BJT tranzistorja, kjer je krmilni priključek (G), prevodni kana je označen s (C) in (D), Slika 20 (b). Statična karakteristika je prikazana na sliki 21.





Slika 21. Statična karakteristika IGBT tranzistor: a) realna, b) idealna.

IGBT tranzistor je primeren za stikalno delovanje pri visokih močeh. V primerjavi z MOSFET-om je krmilna napetost  $V_{GS}$  nekoliko višja, toda tokovne zmogljivostih so bistveno višje, kot pri MOSFET-u. Table 2. podaja primerjavo med močnostnimi tranzistorji.

Property	BJT	MOSFET	IGBT
<b>Voltage rating</b>	High <1kV	High <1kV	Very High >1kV
<b>Current rating</b>	High <500A	Low <200A	High >500A
<b>Input drive</b>	$h_{FE}$ 20-200	3-10V	4-8V
<b>Input impedance</b>	Low	High	High
<b>Output impedance</b>	Low	Medium	Low
<b>Swithing speed</b>	Slow	Fast	Medium
<b>Cost</b>	Low	Medium	High

Tabela 2. Primerjava BJT, MOSFET in IGBT tranzistorji.

Iz predstavljenega lahko zaključimo, da se BJT tranzistor le redko uporablja za močnostne pretvornike, saj ga je moč preprosto nadomestiti s MOSFET tranzistorjem. Pri zelo visokih tokovih ter napetostih je moč uporabiti le IGBT tranzistor.

## 10.4. Stikalni pretvorniki

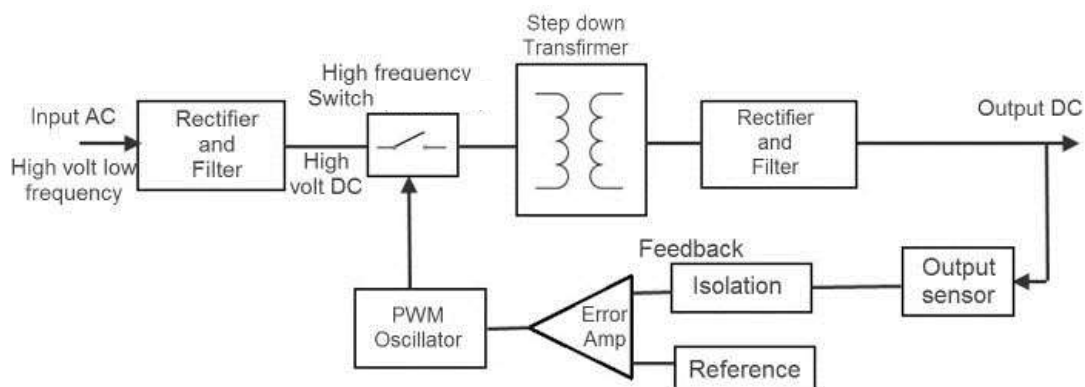
V tem poglavju se bomo izključno omejili na stikalne pretvornike. Stikalni pretvorniki zagotavljajo visok izkoristek, zato so iz vidika ekološkega snovanja primernejši za vgradnjo v večino današnjih elektronskih naprav.

### 10.4.1 AC-DC stikalni pretvorniki - usmerniki

AC-DC pretvorniki so močnostna vezja, ki skrbijo za pretvorbo izmenične napetosti v enosmerno. AD-DC pretvorniki so sklop večine elektronskih naprav. Zato sta njihova učinkovitost ter izkoristek zelo pomembna. Na področju AC-DC pretvornikov poznamo veliko principov ter različnih pristopov. Prednost stikalnega AC-DC usmernika napram klasičnemu, je višji izkoristek in fizično vezje je manjše dimenzije pri istih močeh, kot pri klasičnem pretvorniku. Za namene ekološkega snovanja bomo pokazali princip delovanj



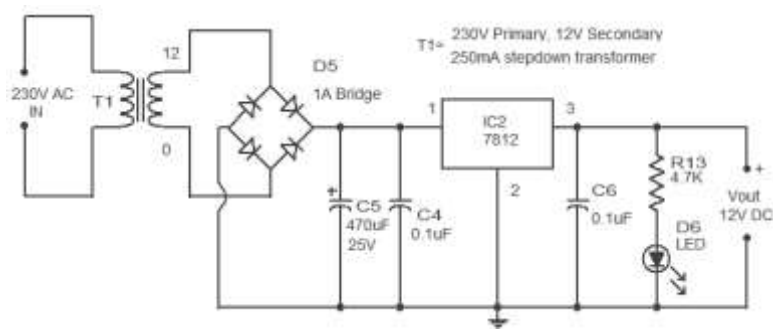
le stikalnega pretvornika, ki je zaradi svojega visokega izkoristka široko prisoten v različnih elektronskih napravah, kot so; TV-sprjemniki, osebni računalniki, avdio naprave itd... Slika 22. prikazuje shemo stikalnega usmernik.



Slika 22. AC-DC stikalni pretvornik.

Stikalni AC-DC pretvornik deluje tako, da v prvem bloku izmenično vhodno napetost takoj usmeri s polvalnimi ali polnovalnim diodnim usmernikom. Mnogi AC-DC pretvorniki v prvi fazi vsebujejo različne filtre za odpravljanje motenj ter špic iz omrežja. V drugi fazi umerjeno napetost peljemo preko visoko frekvenčnega stikala, ki je vodeno glede na želeno izhodno napetost. Frekvenca preklopov je običajno od 10-100kHz odvisno od tipa pretvornika. Iz stikala dobimo vlak pulzov, ki imajo enako frekvenco, kot stikalo. Vlak pulzov peljemo na transformator, ki zniža napetost. Uporabljen transformator zaradi visokih vhodnih frekvenc vsebuje manj ovojev na primarju ter sekundariju, kar drastično zmanjša velikost transformatorja ter količino porabljenega materiala. Na izhodu transformatorja lahko uporabimo nizko prepustni filter za glajenje napetosti ali pa DC-DC stikalni pretvornik. Glede na želeno izhodno enosmerno napetost krmilimo hitrost preklopov stikala.

Slika 23. prikazuje klasični AC-DC pretvornik z vhodnim transformatorjem. Dimenzija transformatorja je pogojena, glede na moči ter razmerje transformacije izmenične napetosti. V primerjavi s transformatorjem pri stikalnem AC-DC pretvorniku je dimenzijsko razmerje lahko celo 1:10 v prid transformatorju pri stikalnem AC-DC pretvorniku.



Slika 23. Klasični AC-DC pretvornik

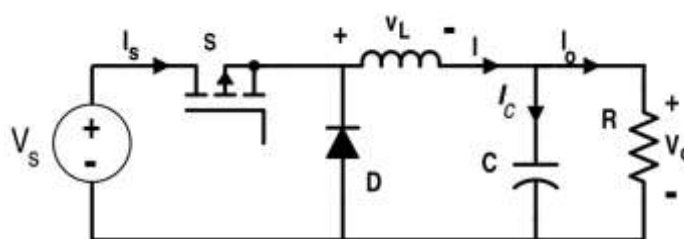


## 10.4.2 DC-DC stikalni pretvorniki

DC-DC pretvorniki se uporabljajo za napajanje enosmernih porabnikov, ki jih najdemo v mnogih elektronskih napravah. Pretvorniki skrbijo za regulacijo enosmerne napetosti na določenih porabnikih. Prav tako se uporabljajo za galvansko ločitev, določenega elektronskega sklopa. Poznamo štiri vrste DC-DC pretvornikov.

- **Pretvornik navzdol (Buck converter)**
- **Pretvornik navzgor (Boost converter)**
- **Pretvornik navzdol in navzgor (Buck-Boost converter)**
- **Čukov pretvornik (Cuk converter)**

**Pretvornik navzdol**, kot že samo ime pove nam znižuje vhodno enosmerno napetost. Shema pretvornika navzdol je prikazana na sliki 24.

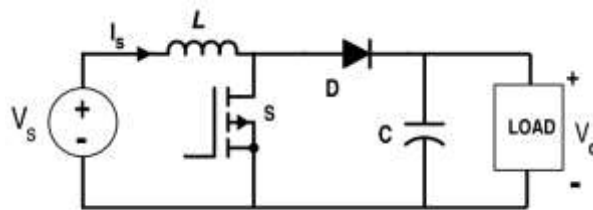


Slika 24. Pretvornik navzdol.

Princip delovanja pretvornika je preprost, s krmiljenjem stikala vodimo vhodno napetost na LC vezje. Ko je stikalo sklenjeno, tok teče skozi LC vezje ter napaja breme. V primeru, ko je stikalo razklenjeno nam dioda sklene sekundarni tokokrog, ki je posledica lastne indukcije v tuljavi. Stikalo ponavadi krmilimo s PWM ('Pulse width modulation') signalom. LC vezje predstavlja tudi nizko frekvenčno sito, ki gladi valovitost izhodne napetosti zaradi preklapljanja stikala. Za kontrolirano stikalo glede na moč lahko uporabimo BJT, MOSFET ali IGBT tranzistor. Glede na razmerje odprtosti in zaprtosti stikala dobimo na izhodu pretvornika povprečno vrednost, ki je nižja od  $V_{IN}$ . S primernim načrtovanjem ter izbiro elementov lahko načrtamo visoko učinkovit ter zanesljiv DC-DC pretvornik. Mnogi proizvajalci nudijo DC-DC pretvornik v integriranem vezju. Integrirana oblika pomeni, da so ključni elementi pretvornika izvedeni v enem čipu. Glede na lastne potrebe je potrebno izbrati tuljavo, referenčno izhodno napetost ter kondenzator.

**Pretvornik navzgor** služi za enosmerne porabnike, ki potrebujejo višjo napetost od priključene. Shema pretvornika navzgor je prikazana na sliki 25.

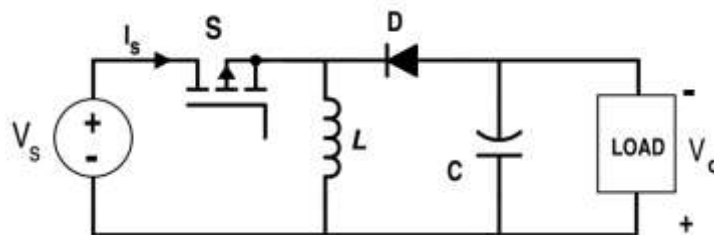




Slika 25. Pretvornik navzgor.

Princip delovanja pretvornika temelji na lastni indukciji vhodne tuljave L. Z hitrimi preklopi stikala povzročimo napetostne špice na tuljavi L. V primeru, ko je stikalo sklenjeno tok teče skozi tuljavo nazaj v napajanje. V tej fazi povzročimo lastno indukcijo tuljave, kar z drugimi besedami pomeni, da shranimo energijo v L. Pri razkleniti stikala, zaradi lastne indukcije, tuljava shranjeno energijo preusmeri skozi diodo v kondenzator, ki deluje, kot hranilnik energije v sekundarnem krogu ter gladilec izhodne napetosti. Velikost napetostni špic je odvisna od hitrosti preklopa stikala. Čim hitrejši je preklop tem višja je napetostna špica na tuljavi L. Tudi v tem primeru stikalo vodimo s PWM signalom, kjer s hitrostjo preklopov vodimo izhodno napetost. Tudi pretvornik navzgor lahko najdemo v integrirani obliki podobno kot pretvornik navzdol.

**Pretvornik navzgor/navzdol.** Glede na skupni priključek v elektronskih vezjih se pogosto pojavlja potreba po negativni napetosti na izhodu pretvornika. Za te namene se uporablja pretvornik navzgor/navzdol, slika 26.



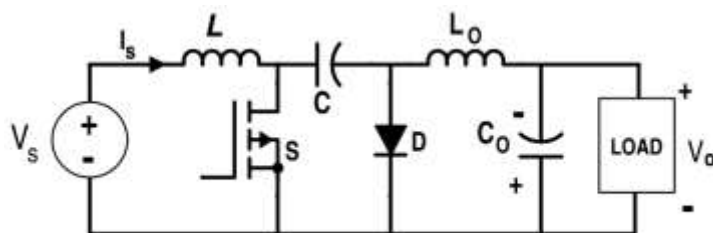
Slika 26. Pretvornik navzdol/navzgor.

Pretvornik navzdol/navzgor je sestavljen iz kaskade pretvornika navzdol in navzgor. Prikazana shema, slika 26 prikazuje realizacijo obeh pretvornikov s polovičnim naborom elementov. Pretvornik lahko generira nižjo ali višjo napetost glede na priključen potencial. Principi delovanja je naslednji. Ko je stikalo sklenjeno teče tok skozi tuljavo L. Če stikalo razklenemo zaradi lastne indukcije tuljave L in negativno polarizirane diode, tok teče v nasprotni smeri. Tako na kondenzatorju C dobimo negativno napetost, glede na priključeno. Razmerje izhodne in vhodne napetosti je podano s prevajalnim razmerjem PWM signala ( $V_o/V_s = D(1/(1-D))$ ). Kjer je D, prevajalno razmerje ('duty cycle') PWM signala. Ta lahko ima v danem primeru samo vrednost med 0 in 1 (0-100%).

**Čukov pretvornik** je dobil ime po Slobodanu Čuku, ki je prvi razvil takšno vezje, slika 27. Čukov pretvornik je v osnovi pretvornik navzdol/navzgor, ki prav tako generira negativno napetost na izhodu. Bistvena razlika čukovega pretvornika je, da za prenos energije v tem primeru skrbi kondenzator in ne tuljava, kot v prejšnjih primerih. Za čukov



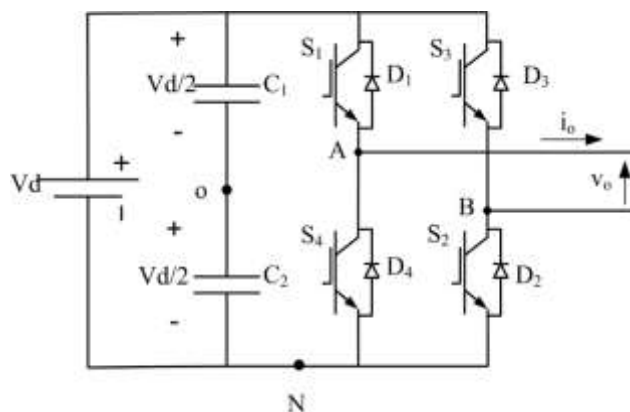
pretvornik je značilno, da se energija prenaša v obeh stanjih stikala (ON in OFF). Pri klasičnem pretvorniku se energija prenaša samo, ko je stikalo v enem stanju odprto ali zaprto.



Slika 27. Čukov pretvornik.

### 10.4.3 DC-AC stikalni pretvorniki – inverterji

DC-AC pretvorniki so močnostna elektronska vezja, ki pretvarjajo izhod enosmernega napetostnega vira, kot so baterije, sončne celice ali gorivne celice v izmenično AC napetost. Inverterji se pogosto uporabljajo za pogon električnih motorje ali napetostni generatorji. Inverterji so ključni sistem pri sistemih neprekinjenega napajanja-UPS ('Uninterruptible Power Supplies System'). Razsmerniki se običajno lahko klasificirajo glede na njihovo izhodno moč ter število faz ( enofazni ali trifazni) in glede na tip pretvorbe (polvalni ali polnovalni) pretvorniki. Pri DC-AC pretvorniki poznamo mnogo tipov ter načinov pretvorbe, zato bomo tukaj obravnavali le enofaznega z mostiščnim vezjem, slika 28.



Slika 28. Enofazni mostiščno razsmerniško vezje.

Princip delovanje vezja temelji na elektronskem vodenju stikal  $S_1$ - $S_4$ . Stikala se preklapljajo diagonalno  $S_1S_2$  in  $S_3S_4$ , kjer je potrebno paziti, da se kratko ne skleneje veje  $S_1S_4$  ali  $S_3S_2$ . S spremembo preklopa para stikal povzročimo spremembo smeri izhodnega toka  $i_o$ . Za vodenje stikal se uporablja PWM modulacija, s katero lahko dobimo relativno gladko izmenično napetost.

