

POLUVODIČKI VENTILI**1. PODJELA ELEKTRONIČKIH VENTILA**

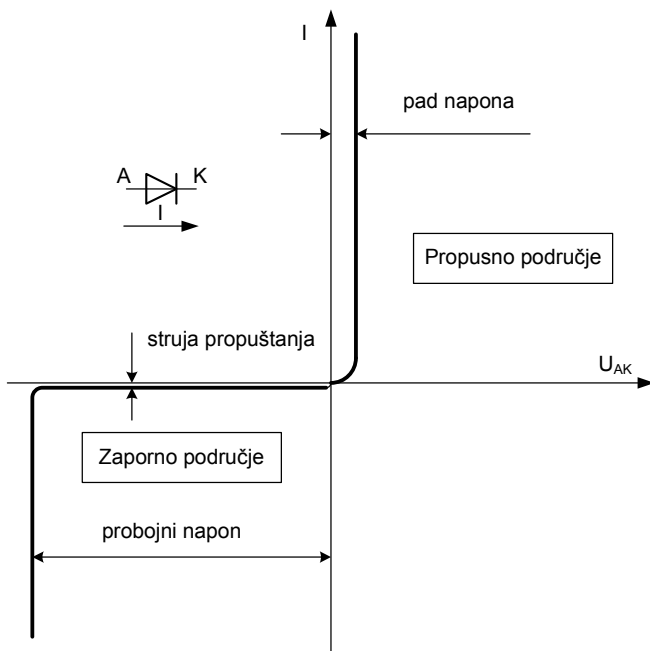
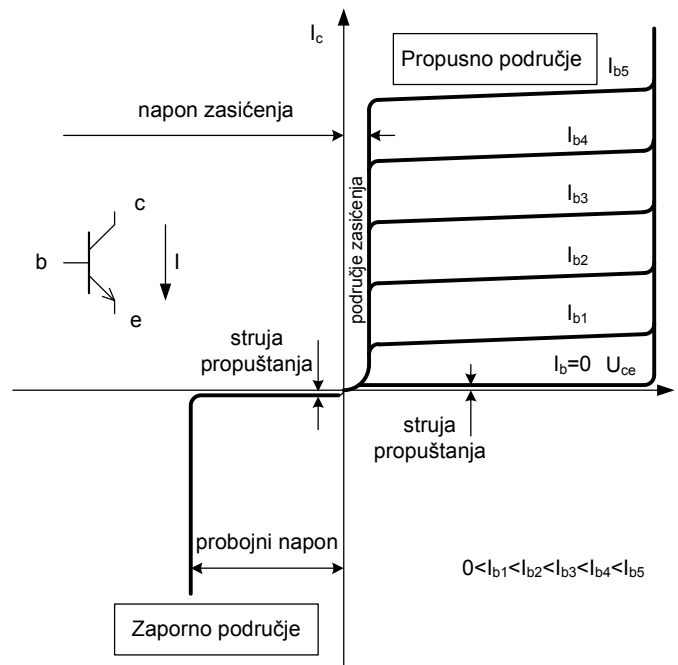
Neupravljivi (dioda): Djeluje kao nepovratni ventil jer vodi struju samo u jednom smjeru i nema upravljačke elektrode a stoga ni mogućnosti upravljanja)

Poluupravljivi (tiristor, triac): Pomoću upravljačke elektrode može se uključiti u željenom trenutku, ali je samostalna kontrola isključivanja nemoguća.

Punoupravljivi (MOSFET, tranzistor, GTO tiristor i njihovi hibridi: IGBT, IGCT, MCT, GCT): Mogu se po želji uključiti i isključiti

2. KARAKTERISTIKE ENERGETSKE DIODE

Dioda vodi struju samo u jednom smjeru pa prema tome ispravlja struju (ne nužno i napon). Dok dioda vodi, na njoj se stvara mali pad napona (0,7-1,6V). Dioda s većim nazivnim naponom imaju i veći pad napona kao i diode predviđene za rad na višim frekvencijama (koje imaju kraće vrijeme oporavljanja $t_r < 50\mu s$). U ispravljačima se koriste ventili predviđeni za rad na 60Hz (Rectifier grade), dok su za prekidačke izvore i izmjenjivače potrebni brži ventili (do 100kHz i $t_r < 50ns$)

3. VANJSKA KARAKTERISTIKA DIODE**5. VANJSKA KARAKTERISTIKA TRANZISTORA****4. KARAKTERISTIKE ENERGETSKOG TRANZISTORA**

Tranzistor je punoupravljivi ventil kojemu se podešavanjem struje baze može regulirati struja koja kroz njega prolazi (struja kolektora odnosno emitera). U energetskej elektronici se gotovo isključivo koriste NPN tranzistori jer su kod većih snaga PNP znatno skuplji a i ne mogu se izraditi za jako velike snage. Pojačanje tranzistora je omjer kolektorske i bazne struje koji za energetske tranzistore iznosi između 15 i 100. Zbog takvog relativno malog pojačanja tranzistor zahtijeva snažne impulse a prema tome i snažne upravljačke sklopove. Reverzni probojni napon je kod tranzistora izuzetno nizak i iznosi oko 10V čak i za tranzistore s vrlo visokim nazivnim naponom. Zbog toga se tranzistor ne može direktno koristiti kao ispravljač, a često ga treba i zaštititi od reverznog napona koji bi ga trenutno uništio. Tri su moguća načina: serijski spojena dioda, antiparalelno spojena dioda i nulldioda (spojena antiparalelno induktivnom teretu).

6. PRIMJENA TRANZISTORA U ENERGETSKOJ ELEKTRONICI

Iako je tranzistor u svojoj osnovi pojačalo koje multiplicira baznu struju, u energetskej se elektronici koristi isključivo kao sklopka odnosno ventil. To znači da je tijekom rada uređaja tranzistor ili isključen ili uključen. Kada je uključen bazna struja mora biti dovoljno velika da tranzistor kod zadane struje kolektora određene naponom napajanja i impedancijom tereta sigurno uđe u zasićenje. Kada bi se za npr. regulaciju snage nekog

uređaja promjenom napona odnosno struje pokušalo tranzistor koristiti kao pojačalo on bi na sebe tijekom uključenog stanja preuzimao veliki napon (kako bi ostatak napona namijenjen serijski spojenom trošilu bio manji) što bi uz veliku struju uzrokovalo i velike gubitke na tranzistoru koji bi stoga morao biti mnogo snažniji i efikasnije hlađen. Zbog toga se u Energetskoj elektronici tranzistorom upravlja nizom impulsa kako bi on u prekidačkom radu poput sklopke vrlo brzo uključivao i isključivao trošilo. Izlazni napon i struja odgovaraju u tom slučaju faktoru intermitencije odnosno omjeru trajanja uključenog stanja i zbroja trajanja uključenog i isključenog stanja. Ukoliko je struja baze prevelika za zadani teret (struju kolektora) tranzistor ulazi u duboko zasićenje pri čemu dolazi do prenapijanja baze pa višak naboja produljuje uključeno stanje tranzistora i nakon što je napajanje baze isključeno, što ima za posljedicu smanjenje frekvencije prekapčanja.

7. GUBICI U TRANZISTORU

Gubici se dijele na gubitke vođenja i gubitke prekapčanja. **Gubici vođenja** računaju se kao umnožak struje i pada napona na tranzistoru (ili nekom drugom ventilu) $P_v = I_c U_{ce}$ i prema tome odgovaraju površini pravokutnika određenog apscisom, ordinatom i radnom točkom na vanjskoj karakteristici tranzistora. Izađe li tranzistor iz zasićenja zbog premale bazne struje ili prevelike struje tereta ovaj se pravokutnik enormno povećava i tranzistor vrlo brzo pregori. **Gubici prekapčanja** su u energetskoj elektronici dominantni a javljaju se kod svakog prelaska iz stanja zasićenja u stanje blokiranja i obratno. Ovisi o frekvenciji prekapčanja i njegovom trajanju koje opet ovisi o karakteristici tereta (induktivitet). Tranzistor može pri nazivnom naponu i struji raditi u prekidačkom režimu rada samo ako je vrijeme prekapčanja kraće od $10\mu s$. Kod produljenih vremena prekapčanja treba uzeti snažniji tranzistor.

8. KARAKTERISTIKE TIRISTORA

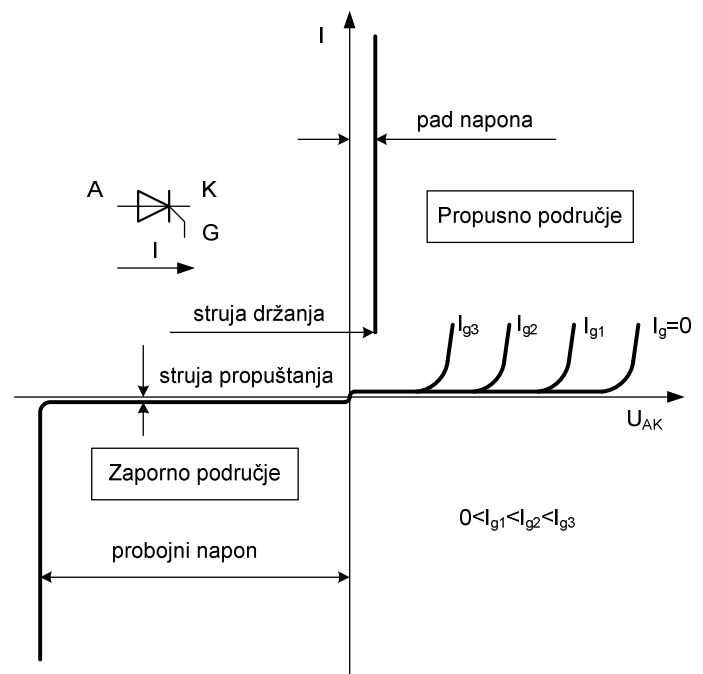
Tiristor je poluupravljivi elektronički ventil koji vodi samo u jednom smjeru, a kojeg se pod uvjetom da je propusno polariziran (+ na anodi a – na katodi) može uključiti slabim kratkotrajnim pozitivnim (u odnosu na katodu) impulsom na upravljačkoj elektrodi – **gate-u**. Kada je jednom proveo tiristor se ne može sam prisilno ugasiti već treba čekati da struja sama padne ispod struje držanja.

Prilikom isključivanja tiristor se ne smije propusno polarizirati dok se ne obnove njegove barijere odnosno dok ne prođe vrijeme oporavljanja t_r . U protivnom bi ponovno proveo i bez upravljačkog impulsa. Oporavljanje je brže ako je tiristor reverzno polariziran. Tiristor može provesti bez upravljačkog impulsa i ako je izložen nagloj promjeni napona $dU_{AK}/dt \gg$ što se događa kod pojave prenapona. Tiristor je osjetljiv na nagli porast struje prilikom ukapčanja di/dt što može jako povećati gubitke.

Tiristor ima jednaki probojni napon u propusnom i reverznom smjeru što ga čini idealnim za primjenu u ispravljačima. Ako mu se u propusnom smjeru dovede veći napon od probojnog tiristor će provesti, a ako je napon veći od probojnog u nepropusnom smjeru tiristor će izgorjeti. Pad napona tijekom vođenja iznosi najmanje 1,4 V i povećava se s povećanjem nazivnog napona tiristora (može biti i veći od 3V).

Tiristor zbog dugog vremena oporavljanja radi na mnogo nižim frekvencijama prekapčanja od tranzistora, ali zato treba mnogo slabije upravljačke sklopove i bolje podnosi preopterećenje.

9. VANJSKA KARAKTERISTIKA TIRISTORA



10. KARAKTERISTIKE GTO TIRISTORA

GTO (Gate Turn Off) tiristor je punoupravljivi ventil koji se uključuje poput tiristora slabim pozitivnim impulsom na gate, ali se za razliku od tiristora može i isključiti i to snažnim negativnim impulsom na GATE.

Omjer anodne struje i struje gate-a pri isključivanju se naziva Turn off gain (pojačanje pri gašenju) i iznosi 3 do 4 (struja gatea potrebna za gašenje je $\frac{1}{4}$ do $\frac{1}{3}$ struje tereta). Isključivanje je vrlo brzo (cca $1\mu s$). Koristi se uglavnom kod izmjenjivača, a nedostaci su mu: reverzni probojni napon manji od 50V, veći pad napona (1V veći od tiristora), veća cijena, dodatni snažni upravljački krugovi za gašenje, manja snaga od tiristora i veći gubici.

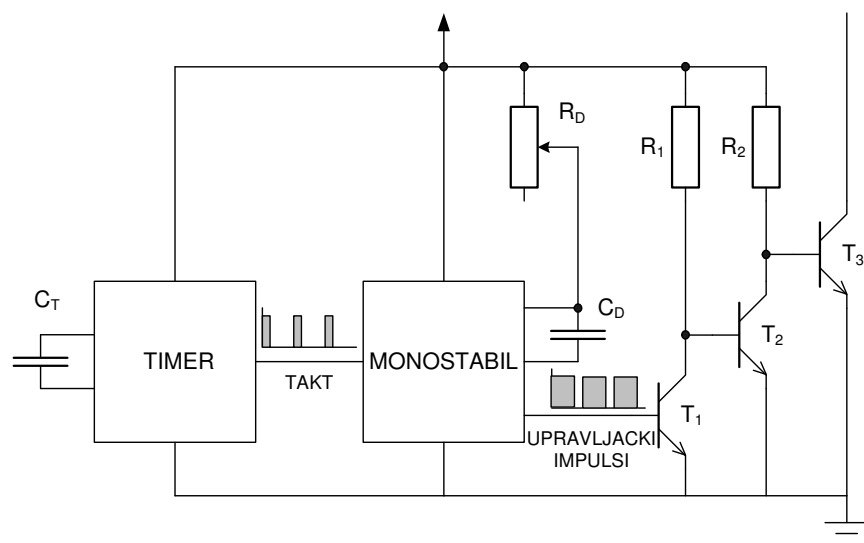
11. KARAKTERISTIKE IGBT

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) je punoupravljivi ventil novije generacije nastao integracijom tranzistora i MOSFET-a koji mu daje struju baze. Danas je kod uređaja većih snaga u potpunosti zamijenio tranzistore. Karakteristike su mu iste kao i tranzistoru samo što MOSFET preko kojeg se upravlja ima izuzetno velik ulazni otpor pa omogućuje upravljanje vrlo slabim strujama i tako pojednostavljuje izvedbu upravljačkih sklopova. IGBT radi na otprilike istim frekvencijama kao i energetski tranzistor, ali ima nešto veći pad napona što uzrokuje povećane gubitke vođenja. Kod kvara IGBT najčešće ostaje u prekidu pa je moguće paralelno spajanje zbog redundancije. IGBT se godinama uspješno koristi u pretvaračima frekvencije manjih snaga. Nazivne vrijednosti struje i napona su preko 1,5 kA i 4,5 kV.

12. KARAKTERISTIKE IGCT

IGCT (Integrated Gate Commutating Thyristor) je punoupravljivi integrirani elektronički ventil zasnovan na GTO tiristoru. Ima sve prednosti GTO tiristora (u odnosu na tranzistore): veliku struju i napon te niske gubitke vođenja, ali ga odlikuje i relativno visoka frekvencija prekapčanja koja kod manjih snaga doseže 20 kHz. Nazivni naponi mogu biti do 6 kV, a struje do 6 kA. Kod velikih snaga se kao i kod tiristora koriste serijski spojevi više jednakih ventila. Kod kvara IGCT u pravilu ostaje u kratkom spoju.

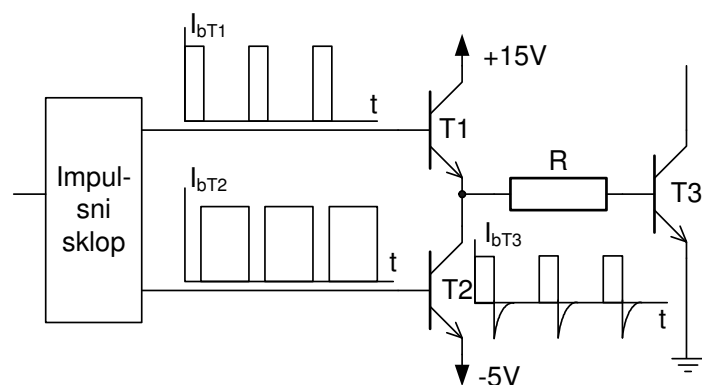
13. UPRAVLJAČKI UREĐAJI ZA TRANZISTORE PRIMJER 1



Tranzistor T_3 spada u energetski dio uređaja i služi za regulaciju struje tereta. C_T određuje radnu frekvenciju prekapčanja odnosno takt timera koji upravlja monostabilom. Pomoću C_D i R_D se mijenja širina upravljačkih impulsa odnosno faktor intermitencije tijekom rada sklopa. Kada dođe impuls na T_1 on provede i kratko spoji bazu i emiter T_2 koji se stoga ugasi, pa se deblokira baza T_3 kojom poteče struja i T_3 provede. Kada završi impuls monostabila T_1 ostane bez bazne struje i ugasi se, pa se deblokira baza T_2 koji dobije baznu struju te provede i time kratko spoji bazu i emiter T_3 čime izvlači naboje s njegove

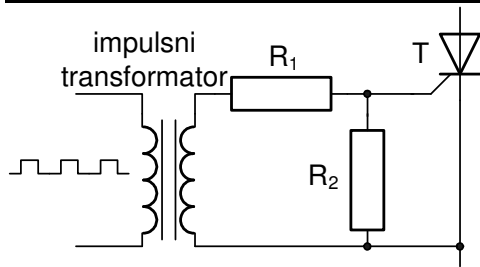
baze. T_3 se stoga brzo ugasi. Ukratko: Kada dođe impuls iz monostabila vode T_1 i T_3 a zapire T_2 , kada impulsa nema obratno: zapiru T_1 i T_3 a vodi T_2

14. UPRAVLJAČKI UREĐAJI ZA TRANZISTORE PRIMJER 2



MOS Clock Driver daje par komplementarnih impulsa koji se dovode na baze tranzistora T_1 i T_2 . Zbog toga kada vodi T_1 ne vodi T_2 i obratno. Kada dođe impuls na T_1 on provede i dovede baznu struju na T_3 koji predstavlja energetski dio uređaja i upravlja sa strujom tereta. T_3 provede. Kada završi impuls na T_1 on se ugasi ali istovremeno započne impuls na T_2 koji se upali i spoji bazu T_3 na negativni napon. Struja baze T_3 je stoga negativna i omogućuje brzo izvlačenje naboja iz baze T_3 i time njegovo brzo gašenje.

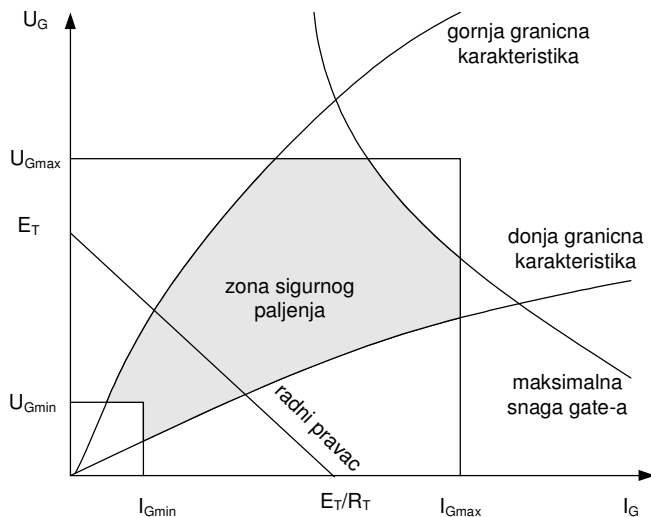
15. OKIDNI SKLOPOVI ZA TIRISTORE



Impulsi iz upravljačkog dijela dolaze na izolacijski transformator koji odvaja energetske dio uređaja na kojem vladaju mnogo viši naponi od upravljačkog dijela, tako da u slučaju proboja na upravljačke elektrode ne može doći do pojave visokog napona na upravljačkom dijelu. U nekim uređajima impulsni transformator ujedno omogućuje istovremeno okidanje tiristora kojima su katode na različitim potencijalima. U tom slučaju impulsni transformator ima više odvojenih sekundarnih namotaja (za svaki tiristor jedan). Otpornik R_1 ograničava struju gate-a

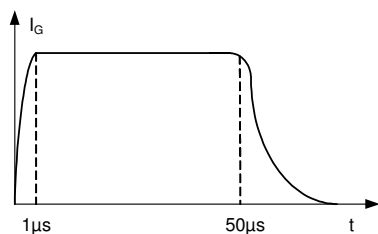
I_G , a otpornik R_2 napon gate-a U_G . Oni ujedno zajedno s naponom impulsa dobivenim preko impulsnog transformatora određuju radni pravac na $U_G(I_G)$ karakteristici koji se dobije primjenom Theveninovog teorema.

16. KARAKTERISTIKA PALJENJA TIRISTORA $U_G(I_G)$

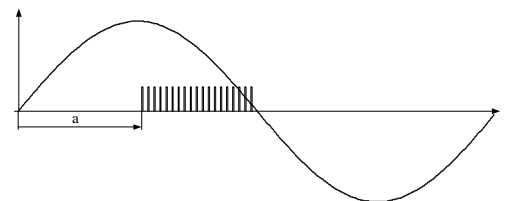


Upravljački impulsi na izlazu iz okidnog sklopa moraju omogućiti sigurno paljenje tiristora, što je moguće samo ako radni pravac okidnog sklopa prolazi kroz zonu sigurnog paljenja. Karakteristike svih tiristora određene serije nalaze se između gornje i donje granične karakteristike. Da bi tiristor upalio napon gate-a mora biti veći od minimalnog napona paljenja U_{Gmin} , a njegova struja od minimalne struje paljenja I_{Gmin} . I_{Gmin} i U_{Gmin} ovise o temperaturi pa kod vrlo niskih temperatura trebaju već napon i struja. Ne smiju se preći maksimalne vrijednosti struje i napona gatea I_{Gmax} i U_{Gmax} , kao ni maksimalna dozvoljena snaga P_{Gmax} jer bi u tom slučaju došlo do oštećenja tiristora. Tiristor u pravilu provede čim struja i napon gate-a prijeđu minimalne vrijednosti paljenja.

17. TIPIČNI OBLIK IMPULSA OKIDNOG SKLOPA ZA UPRAVLJANJE TIRISTOROM



Da bi se postigla preciznost rada i smanjili gubici tiristor treba upaliti u što kraćem vremenu, pa struja I_G mora imati nagli porast. Predugi impulsi stvaraju nepotrebne gubitke $P_G = I_G U_G$. Kod mrežno komutiranih ispravljača daje se niz impulsa



počevši od trenutka kada tiristor treba provesti pa sve dok ne postane reverzno polariziran. Takav slijed impulsa se naziva češalj. Tiristor će u pravilu provesti kod prvog impulsa.

ISPRAVLJAČI

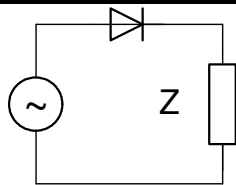
18. PULSNI BROJ I PODJELA ISPRAVLJAČA

Pulsni broj je mjerilo kvalitete ispravljenog napona i predstavlja broj pulzacija u ispravljenom naponu za vrijeme jedne periode ulaznog izmjeničnog napona.

Ispravljači se prema tome da li koriste samo pozitivnu ili obje poluperiode ulaznog izmjeničnog napona dijele na: **poluvalne i punovalne**. Jasno je da punovalni imaju dvostruko veći pulsni broj, a time i kvalitetu izlaznog ispravljenog napona. Prema vrsti ventila koje koriste ispravljači se dijele na: **neupravljive, poluupravljive i punoupravljive**. Neupravljivi su sastavljeni od dioda i nemaju mogućnost regulacije izlaznog istosmjernog napona. Poluupravljivi su sastavljeni od jednakog broja dioda i tiristora i mogu regulirati izlazni istosmjerni napon ali je njegova kvaliteta posebno kod malih izlaznih vrijednosti slabija nego kod punoupravljivih koji su sastavljeni od tiristora. Prema načinu rada ispravljači se dijele na **aktivne i pasivne**. Kod pasivnih ispravljača ventili (dioda i tiristori) su mrežno komutirani (gase se pojavom reverznog napona na ventilu kao posljedicom promjena u mrežnom naponu), dok se kod aktivnih koristi prisilna komutacija punoupravljivih ventila (GTO, IGCT, IGBT, tranzistor). Prema mogućnosti protoka energije ispravljači se dijele na **jednosmjerne**

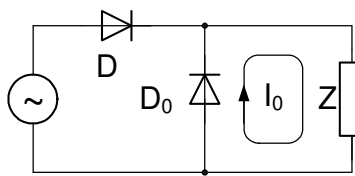
(neupravljivi i poluupravljivi) koji mogu raditi samo u ispravljačkom režimu rada tj. uzimati energiju iz izmjenične mreže i predavati je istosmjernoj potrošnji i **dvosmjerne** (punoupravljivi tiristorski i aktivni ispravljači) koji mogu i vraćati energiju u izmjeničnu mrežu tijekom npr. generatorskog koćenja motora kojim upravljaju.

19. JEDNOFAZNI POLUVALNI NEUPRAVLJIVI ISPRAVLJAČ S DJELATNIM I INDUKTIVNIM OPTEREĆENJEM



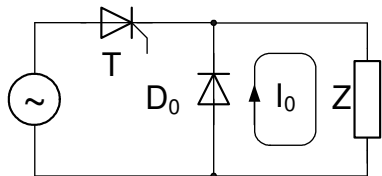
Dioda propušta struju samo u jednom smjeru. Kod djelatnog opterećenja struja tereta odgovara naponu. Dioda vodi tijekom pozitivne poluperiode pa se na teretu javlja poluvalno ispravljeni napon i struja istog oblika. Kod induktivnog opterećenja, tijekom pozitivne poluperiode u magnetskom polju tereta dolazi do akumuliranja magnetske energije, tako da nakon završetka pozitivne poluperiode teret, koristeći akumuliranu energiju, nastoji zadržati magnetski tok, pa dolazi do pojave napona samoindukcije, koji tjera struju u istom smjeru sve dok se akumulirana energija ne potroši. To znači da struja kroz diodu teče i nakon što je došlo do promjene polariteta na izvoru. To znači da je teret preko diode spojen na izvor i ima isti negativni napon. Tok energije je od tereta prema izvoru. U ispravljenom naponu (na teretu) javljaju se dakle i negativni dijelovi.

20. KOMUTACIJSKA DIODA (NULDIODA)



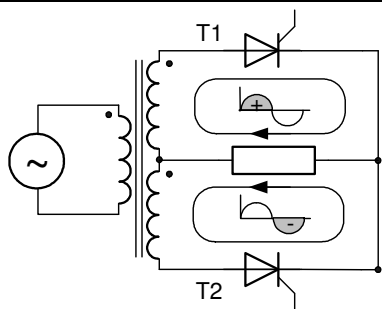
Spaja se antiparalelno induktivnom teretu napajanom iz ispravljača ili čopera, kako bi omogućila zatvaranje struje koju tjera induktivitet tereta nakon što je napajanje promijenilo polaritet ili je isključeno. Kod ispravljača to znači da se neće pojaviti negativni dijelovi u ispravljenom naponu i da će ispravljački ventil (dioda D) isključiti čim napon izvora padne na nulu. Kod prekidačkih izvora (chopper) i elektromagnetskih uređaja (sklopnika, releja, ventila) napajanih preko tranzistora komutacijska dioda omogućuje njegovo brzo gašenje i oporavljanje te ga štiti od uništenja.

21. JEDNOFAZNI POLUVALNI UPRAVLJIVI ISPRAVLJAČ S INDUKTIVNIM OPTEREĆENJEM I NUL-DIODOM KOD VELIKOG I MALOG OPTEREĆENJA



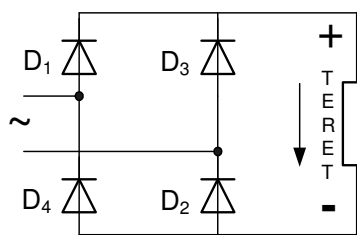
Tiristor T se može upaliti impulsom na samom početku pozitivne poluperiode ($\alpha=0$) ili kasnije. Što se kasnije okida tiristor odnosno što je veći kut vođenja α , to je srednja vrijednost izlaznog ispravljenog napona manja, pa se na taj način regulira napon i snaga na teretu. Induktivitet tereta produžuje tok struje kroz teret i za vrijeme negativne poluperiode (struja se zatvara preko nul diode D_0) pa se s dovoljno velikim induktivitetom kod malog kuta vođenja (ranog okidanja) odnosno velikog opterećenja može postići kontinuirana struja (struja ne pada na nulu). Kod velikih kuteva vođenja odnosno pri malom opterećenju induktivitet ne može sakupiti dovoljno energije da bi održao tok struje do novog okidanja tiristora pa se struja prekida. To se naziva diskontinuirana struja. Ista pojava se može dogoditi i pri malim opterećenjima istosmjernih motora napajanih iz trofaznih tiristorskih ispravljača.

22. PUNOVALNI ISPRAVLJAČ U SPOJU SA SREDNJOM TOČKOM



Transformator ima dva sekundarna namota spojena na sredini. Kao ventili se mogu koristiti tiristori ili diode (neupravljivi ispravljač). Tijekom pozitivne poluperiode mrežnog napona vodi tiristor T_1 dok je tiristor T_2 reverzno polariziran i blokira. U negativno poluperiodi je obratno. U oba slučaja struja tereta teče u istom smjeru. Ventili su opterećeni dvostrukom vršnom vrijednosti napona koji se dovodi teretu jer kada T_1 vodi T_2 mora blokirati zbroj dva sekundarna napona. Stoga su ventili pojedinačno dvostruko skuplji od onih primjenjenih u mosnom spoju, ali ih s druge strane ima upola manje. Transformator je otprilike iste cijene kao i u mosnom spoju jer na sekundaru ima dvostruko više zavoja dvostruko tanje žice (svaki sekundarni namot je opterećen samo u jednoj poluperiodi dok u mosnom spoju jedan sekundarni namot vodi i pozitivnu i negativnu poluperiodu)

23. JEDNOFAZNI MOSNI DIODNI ISPRAVLJAČ (GRETZOV SPOJ)



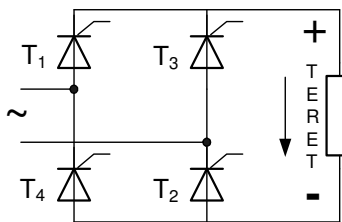
Tijekom pozitivne poluperiode izmjeničnog napona struja teče kroz diodu D1 – TERET – diodu D2, a tijekom negativne poluperiode kroz diodu D3 – TERET – D4.



Struja kroz teret teče uvijek u istom smjeru što znači da je ispravljena. Gretzov spoj dobro funkcionira i kod induktivnog tereta jer se prelaskom u negativnu poluperiodu struja odmah komutira na druge dvije diode. Za vrijeme trajanja komutacije je izvor kratko spojen jer istovremeno vode diode D1 i D3 odnosno D2 i D4, pa nastaju kratkotrajni

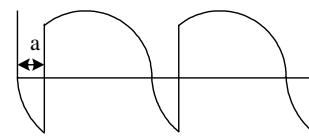
udarci struje i kao njihova posljedica komutacijski propadi napona.

24. JEDNOFAZNI MOSNI TIRISTORSKI ISPRAVLJAČ

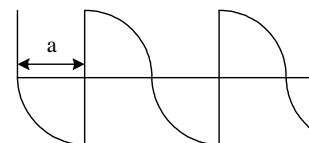


Zamijene li se diode u Gretzovom spoju tiristorima dobije se punoupravljivi jednofazni ispravljač. Tijekom pozitivne poluperiode vode tiristori T₁ i T₂ a tijekom negativne tiristori T₃ i T₄. Spomenuti parovi tiristora moraju impulse dobivati istovremeno. Kod vrlo induktivnog tereta pri prelasku iz pozitivne u negativnu poluperiodu tiristori T₁ i T₂ vode sve dok

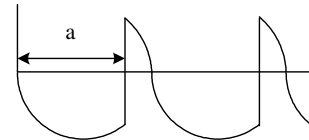
se ne uključe tiristori T₃ i T₄ pa se na teretu javljaju i negativni dijelovi napona. Isto se događa i pri prelasku iz negativne poluperiode u pozitivnu. Javljaju se veći komutacijski propadi napona nego kod diodnog mosta. Struja koju sklop uzima iz mreže je kod induktivnog tereta pravokutna. Ako se kut vođenja α poveća preko 90° sklop prelazi u izmjenjivački režim rada što znači da je tok energije promijenjen i teče od istosmjernog tereta prema izmjeničnoj mreži, naravno pod uvjetom da na istosmjernoj strani ima dovoljno energije (generator, akumulator). Struja je pravokutnog oblika.



Ispravljački režim rada $\alpha < 90^\circ$

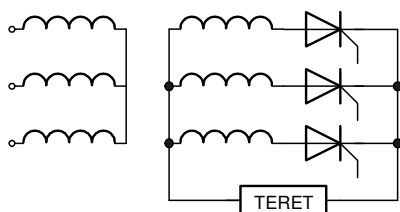


Bez izmjene energije $\alpha = 90^\circ$

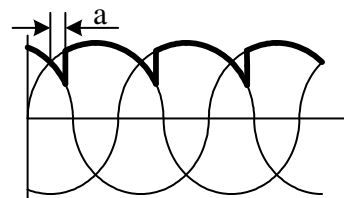


Izmjenjivački režim rada $\alpha > 90^\circ$

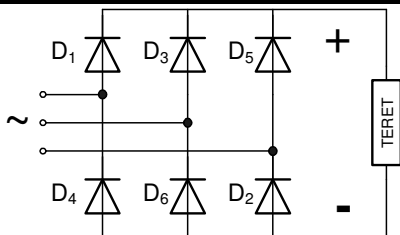
25. TROFAZNI POLUVALNI TIRISTORSKI ISPRAVLJAČ



Svaki tiristor upravlja s jednom fazom. Kut vođenja α računa se od trenutka kada bi trebalo doći do prirodne komutacije (da je riječ o diodnom sklopu) a ne od trenutka prolaska napona kroz nulu.



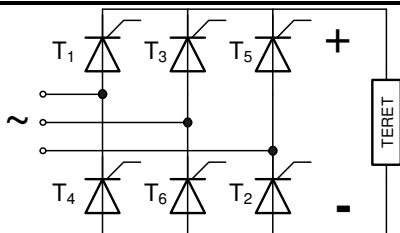
26. TROFAZNI MOSNI DIODNI (NEUPRAVLJIVI) ISPRAVLJAČ



Ovo je punovalni 6-pulsni ispravljač koji na izlazu daje vrlo kvalitetan napon relativno male valovitosti. U svakom trenutku vode dvije diode koje su na najvećoj razlici potencijala. Npr. D1 počne voditi zajedno sa D6, da bi kasnije struja komutirala s diode D6 na diodu D2. Zatim struja komutira s D1 na D3, pa sa D2 na D4, onda D3 na D5, pa D4 na D6 i konačno D5 na D1 čime se krug zatvara.

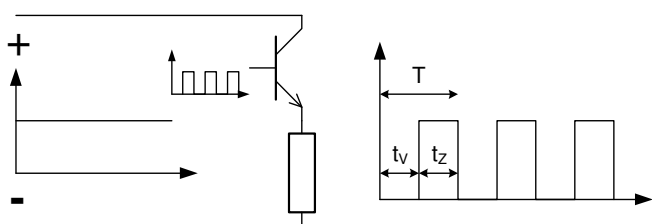


27. TROFAZNI MOSNI TIRISTORSKI (PUNOUPRAVLJIVI) ISPRAVLJAČ



6-pulsni punovalni punoupravljivi ispravljač koji može raditi i u izmjenjivačkom režimu (kada je $\alpha > 90^\circ$). Daje kvalitetan napon na izlazu. Redosljed vođenja je isti kao i kod diodnog mosta s tom razlikom da prethodni par tiristora vodi sve dok sljedeći tiristor ne dobije impuls za paljenje. Ako se donji red tiristora zamijeni diodama dobije se poluupravljivi mosni ispravljač slabijih karakteristika (jednosmjerni, pogodan za regulaciju elektromotornih pogona koji ne mijenjaju brzinu)

28. PRINCIP RADA ČOPERA I VALNI OBLIK IZLAZNOG NAPONA

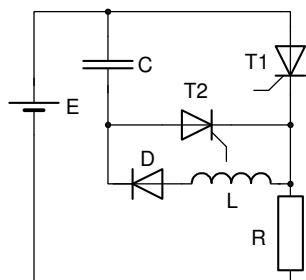


odnosno odnosu između trajanja perioda uzimanja energije iz istosmjernog izvora t_v (ventil uključen) i perioda T nakon kojeg se ciklus ponavlja. Čoperi u pravilu rade na višim frekvencijama (barem 1kHz) kako bi valovitost izlaznog napona (struje) bila što manja, a time i kvaliteta regulacije veća.

Čoperi su regulatori istosmjernog napona (struje) koji uključivanjem i isključivanjem elektroničkih ventila sjeckaju ulazni napon i tako na izlazu daju regulirani istosmjerni napon (ili struju) koji je obično niži ali može biti i viši od ulaznog. Visina izlaznog napona odnosno jakost struje tereta ovisi o faktoru intermitencije α ,

$$\alpha = \frac{t_v}{T} = \frac{t_v}{t_v + t_z}$$

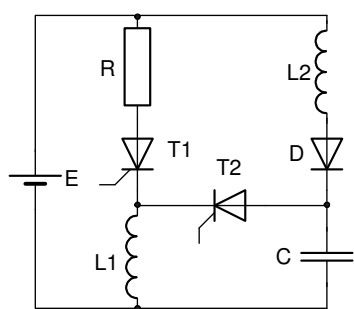
29. ČOPER S POMOĆNIM TIRISTOROM I PARALELNO SPOJENIM KONDENZATOROM



Čoperi s pomoćnim tiristorima u pravilu rade s konstantnom frekvencijom odnosno nepromjenljivim periodom T tj. taktom upravljačkih impulsa dovedenih glavnom tiristoru iz upravljačkog impulsnog sklopa. Faktor intermitencije se mijenja promjenom trenutka okidanja pomoćnog tiristora koji ima ulogu gašenja glavnog tiristora. Na sklopu prema slici T1 je glavni tiristor a T2 pomoćni. Uloga pomoćnog tiristora je da antiparalelnim spajanjem nabijenog kondenzatora C na glavni tiristor T1 istoga reverzno polarizira i tako ga ugasi. Bitno je uočiti da sklopa započinje

okidanjem pomoćnog tiristora T2 pri čemu struja poteče u krugu E-C-T2-R(teret)-E. Kada se kondenzator nabije struja tiristora T2 padne na nulu (u stvari ispod struje držanja) i on se ugasi. Kondenzator je nabijen tako da je + gore (na anodi T1). Sada se impulsom pali glavni tiristor T1 koji u stvari uključuje dva strujna kruga: 1. veliku petlju E-T1-R-E s naponskim izvorom i 2. malu petlju C-T1-L-D-C s nabijenim kondenzatorom kao izvorom. U velikoj petlji izvor E potjera kroz teret istosmjernu konstantnu struju $I=E/R$. Mala petlja je titrajni krug koji okidanjem tiristora T1 započne s oscilacijama. Kondenzator se najprije isprazni i preda energiju zavojnici koja ga u nastavku reverzno polarizira. Kada se kondenzator prepolarizira struja u titrajnom krugu padne na nulu i trebala bi promijeniti smjer, što joj brani dioda D. Oscilacije su zaustavljene, a kondenzator je spreman za gašenje T1 (- gore - na anodi T1). Okidanjem T2 kondenzator se spaja antiparalelno glavnom tiristoru T1, reverzno ga polarizira i gasi, a za vrijeme gašenja (dok traje oporavljanje glavnog tiristora T1), struju tereta preuzima kondenzator C koji se prazni i prepolarizira u krugu E-C-T2-R-E. .

30. ČOPER SA SERIJSKIM INDUKTIVITETOM I POMOĆNIM TIRISTOROM



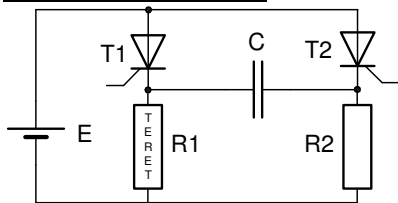
T1 je glavni tiristor a T2 pomoćni. Samim priključenjem na istosmjerni izvor napajanja E prije bilo kakvih impulsa na tiristorima, poteče struja u titrajnom krugu E-L2-D-C-E pri čemu se kondenzator C napuni na dvostruki napon izvora $U_C=2E$. + je na gornjoj ploči (katoda diode D).

Do pojave dvostrukog napona izvora dolazi zbog toga što je stacionarno stanje (kada ne teče struja) ovog titrajnog kruga kod $U_C=E$, a u trenutku uključivanja je $U_C=0$, što znači da je odmak od stacionarnog stanja (amplituda oscilacija) vrijednosti E. Titrajni krug će stoga oscilirati simetrično oko stacionarnog stanja s amplitudom E, dakle od $U_C=0$ do $U_C=2E$. U trenutku kada se kondenzator C

napuni na $2E$ struja padne na nulu i trebala bi promijeniti smjer, što ne dozvoljava dioda D koja dakle blokira daljnje oscilacije i zamrzne trenutnu situaciju $U_C=2E$. Nakon opisanog priključka na napajanje E, najprije okida glavni tiristor T1 i zatvara strujni krug E-R-T1-L1-E, u kojem se nakon kratkotrajne aperiodeske prijelazne pojave rasta struje s vremenskom konstantom $T=L1/R$, stabilizira struja $I=E/R$. Interval vođenja (t_v) se prekida okidanjem pomoćnog tiristora T2, koji spaja kondenzator u paralelu s induktivitetom L1, zatvarajući titrajni krug C-T2-L1-C. Promotri li se petlja E-R-T1-T2-C-E (II Kirchhoffov zakon) jasno je da je u trenutku uključivanja T2, glavni tiristor zbog $U_C=2E$ reverzno polariziran ($E-U_C=E-2E=-E$) pa se gasi. U titrajnom krugu C-T2-L1-C kondenzator razmijeni energiju s L1 i pritom se prepolarizira (- je dolje $U_C=-2E$). Oscilacije s L1 se ne mogu nastaviti jer nakon prepolarizacije (nabijanja kondenzatora na suprotnu stranu) struja tiristora T2 padne na nulu pa se on ugasi i blokira prolaz struje u suprotnom smjeru. S druge strane prepolarizirani

kondenzator C potpomognut izvorom E potjera nove oscilacije u krugu E-L2-D-C-E. Za razliku od stanja na početku, sada je kondenzator nabijen na $U_C = -2E$, što znači da je odmak od stacionarnog stanja $U_C = E$ sada $3E$ pa će napon na kondenzatoru nakon jedne poluperiode skočiti na $4E$. Napon kondenzatora bi se na taj način teoretski povećavao u svakom ciklusu. U praksi međutim gubici priguše oscilacije pa se napon na kondenzatoru „stabilizira“ na vrijednosti nekoliko puta većoj od vrijednosti napona izvora E. Treba još pojasniti da je $L_2 \gg L_1$ pa su i oscilacije titrajnog kruga L_1C mnogo brže od oscilacija u titrajnom krugu L_2C , pa se stoga može smatrati da se kondenzator u potpunosti prepolarizirao prije nego što provede dioda D. U stvarnosti dioda provede čim se kondenzator isprazni na napon manji od E jer je od tog trenutka dioda propusno polarizirana.

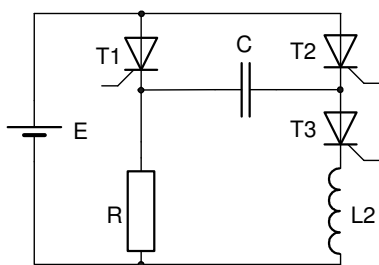
31. ČOPER S PARALELNIM KONDENZATOROM I POMOĆNIM TIRISTOROM BEZ INDUKTIVITETA



Sklop je simetričan ali se T1 smatra glavnim tiristorom jer priključuje teret na izvor napajanja, a T2 pomoćnim tiristorom jer služi za gašenje T1. Impuls najprije pali T1 pa poteče struja tereta $I = E/R_1$ i struja punjenja kondenzatora u krugu E-T1-C-R2-E. Kondenzator se nabije na napon izvora $U_C = E$ + je lijevo na katodi tiristora T1 što znači da je spreman za njegovo gašenje. Na kraju perioda vođenja okida pomoćni tiristor T2 i spaja kondenzator antiparalelno

glavnom tiristoru T1 koji je prema tome reverzno polariziran pa se gasi. Struju tereta preuzima krug E-T2-C-R1-E u kojem se ujedno i najprije prazni, a zatim i prepolarizira kondenzator C ($U_C = -E$ + je desno na katodi tiristora T2). Kapacitet kondenzatora mora biti dovoljno velik da se ne isprazni prije nego što prođe vrijeme oporavljanja tiristora T1. Nakon što se kondenzator prepolarizirao, pomoćni tiristor T2 se ne gasi već ostaje upaljen jer teče konstantna struja u krugu E-T2-R2-E, sve dok se u sljedećem ciklusu ponovno impulsom ne upali T1 i antiparalelno spoji C na T2, reverzno ga polarizira i ugasi. Kondenzator se prepolarizira, a struja teče kroz teret R1 itd. Nedostatak ovog čopera su gubici na R2 tijekom prekida struje kroz teret R1. Ovi se gubici mogu smanjiti ako se R2 poveća, ali se time produljuje vrijeme punjenja kondenzatora preko T1, i time ograničava radna frekvencija čopera. Ovaj je čoper s druge strane idealan za upravljanje s dva tereta koji rade naizmjenično.

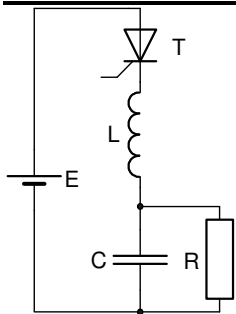
32. ČOPER S PARALELNIM KONDENZATOROM I DVA POMOĆNA TIRISTORA



T1 je glavni dok su T2 i T3 pomoćni tiristori. Najprije okida T1 i poteče struja tereta $I = E/R$. Zatim okida T3 koji zatvara titrajni krug E-T1-C-T3-L2-E u kojem se kondenzator nabije na dvostruki napon izvora $U_C = 2E$ + na katodi T1. U tom bi trenutku struja kondenzatora trebala promijeniti smjer i prazniti kondenzator u istom krugu, ali se zbog nestanka struje gasi T3 koji i onako ne može voditi u suprotnom smjeru. Interval vođenja (t_v) se prekida okidanjem pomoćnog tiristora T2, koji spaja kondenzator C antiparalelno tiristoru T1 koji je time reverzno polariziran i gasi se. Kondenzator se najprije isprazni a zatim i

prepolarizira na napon $U_C = -E$ (+ na katodi T2) u krugu E-T2-C-R-E. Kada se kondenzator napunio struja padne na nulu pa se ugasi i tiristor T2. Kada se u sljedećem ciklusu upali T1 i nakon njega T3, kondenzator će se prepolarizirati i nabiti na $3E$ jer je stacionarno stanje $U_C = E$ a početno stanje $U_C = -E$ što znači da je amplituda $2E$, pa je nadvišenje odnosno maksimalna vrijednost $U_C = E + 2E = 3E$. Na kraju tog drugog ciklusa će se kondenzator ponovno prepolarizirati preko T2 i nabiti na isti napon kao i na kraju prvog ciklusa dakle na $U_C = -E$, pa će i u svi sljedeći ciklusi izgledati kao drugi ciklus.

33. ČOPER S REZONANTNIM GAŠENJEM I SERIJSKIM LC SPOJEM

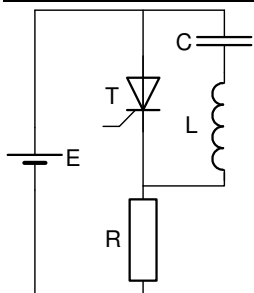


Čoperi s rezonantnim gašenjem nemaju pomoćni tiristor već se paljenjem glavnog tiristora pokreću oscilacije koje u jednom trenutku oduzmu struju tiristoru koji se zbog toga ugasi. Za razliku od čopera s pomoćnim tiristorima koji rade s konstantnom radnom frekvencijom (ne mijenja se frekvencija impulsa za paljenje tiristora već samo njihov fazni pomak), kod čopera s rezonantnim gašenjem se napon ili struja trošila reguliraju promjenom frekvencije impulsa. Češći impulsi daju veću vrijednost napona (struje).

Kod čopera s serijskim LC rezonantnim krugom prikazanom na slici nakon okidanja tiristora dolazi do oscilacija u krugu E-T-L-C-E koje završavaju nabijanjem kondenzatora na dvostruki napon izvora $U_C = 2E$ (+ je gore na), jer tada struja padne na nulu pa se ugasi tiristor T koji i onako ne može voditi u suprotnom smjeru. Iako se na prvi pogled može činiti da će tiristor nastaviti voditi struju u krugu E-T-L-R-E, to se ne događa jer je kondenzator u tom trenutku na dvostrukom

naponu izvora pa struju tereta daje on a ne dvostruko slabiji napon izvora. Uostalom kada bi to tiristor dozvoljavao (negativna struja) u takvoj bi situaciji kondenzator punio izvor. Kondenzator naravno mora imati dovoljno veliki kapacitet da ga struja tereta ne isprazni na napon niži od E u vremenu krećem od vremena oporavljanja tiristora. Dok je tiristor ugašen Kondenzator pohranjenu energiju predaje teretu. Sljedeći impuls može se najranije dati tek kada tiristor ponovno postane propusno polariziran ($A+$, $K-$) a to je kada napon na kondenzatoru padne ispod E .

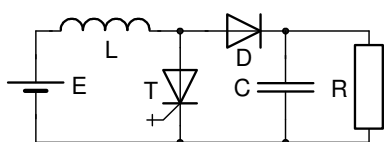
34. ČOPER S REZONANTNIM GAŠENJEM I PARALELNIM LC SPOJEM



Čim se sklop priključi na napajanje (izvor E) poteče struja u krugu $E-C-L-R-E$ i aperiodski ili oscilatorno napuni kondenzator na napon izvora tj. $U_C=E$ (+ gore). Ako se tijekom punjenja kondenzatora i pojavi napon viši od E (oscilatorni odziv), on se ponovno smanji jer se oscilacije uz veliko prigušenje zbog otpora tereta nastavljaju sve do postizanja stacionarnog stanja kod $U_C=E$. U krugu naime nema ventila koji bi oscilacije zaustavio spriječivši negativan protok struje. Okidanjem tiristora uključuju se istovremeno dva strujna kruga: 1. Struja tereta $I=E/R$ teče u krugu $E-T-R-E$ a tjera je napon izvora E ; 2. U titrajnom krugu $C-T-L-C$ kondenzator u kojem je pohranjena energija pokreće oscilacije koja ga najprije prepolariziraju (+ dolje) pri čemu se struja ovog titrajnog kruga zbraja

sa strujom tereta i tako povećava struju tiristora, da bi nakon toga struja promijenila smjer i umanjivala struju tiristora. Tiristor se gasi u trenutku kada se struja titrajnog kruga izjednači sa strujom tereta, jer mu tada struja padne na nulu. Ostatak energije pohranjene u kondenzatoru izbije se u krugu $E-C-L-R-E$ u kojem se i kondenzator ponovno nabije na početno stanje $U_C=E$ (+ gore) i čeka drugi ciklus, odnosno drugi impuls na tiristor.

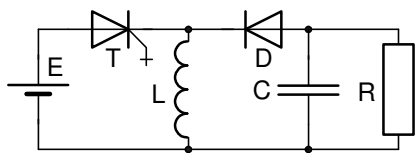
35. ČOPER ZA POVIŠENJE NAPONA



Čoperi za povišenje napona u pravilu rade na principu pohranjivanja energije u induktivitetu za vrijeme vođenja ventila, koja se nakon njegovog gašenja preko dioda kanalizira prema teretu s kondenzatorom za smanjenje valovitosti napona i struje. Ovdje je prikazana najjednostavnija inačica s GTO tiristorom koji se u istoj konfiguraciji može zamijeniti i s bilo kojim drugim punoupravljljivim

ventilom. Priključivanjem sklopa na izvor E (prije okidanja GTO) poteče struja u krugu $E-L-D-R-E$ koja napuni kondenzator na napon izvora $U_C=E$ i ujedno daje trajnu minimalnu struju tereta $I=E/R$ (teret se ovim čoperom ne može isključiti). Kada se impulsom na upravljačku elektrodu (gate) uključi GTO tiristor on spoji induktivitet L paralelno izvoru E pri čemu započne prijelazna pojava porasta struje (punjenja induktiviteta). Treba napomenuti da je nakon završetka prijelazne pojave ovo kratki spoj izvora jer induktivitet ne predstavlja otpor istosmjernoj struji. Međutim, prije završetka prijelazne pojave, a u trenutku kada je induktivitet preuzeo dovoljno energije za željeni režim rada tereta, GTO se gasi (negativnim impulsom na gate). Energija sadržana u magnetskom polju induktiviteta nastoji zadržati nepromijenjeni magnetski tok pa nastavlja tjerati istu struju koja se sada više ne može zatvoriti kroz GTO tiristor već je prisiljena teći u krugu $E-L-D-C-E$ i pri tome puniti kondenzator na napon viši od napona izvora E . Napon na koji se puni kondenzator ovisiti će o vremenu uključenosti GTO tiristora T .

36. ČOPER ZA POVIŠENJE I SNIŽENJE NAPONA



Ovim se čoperom može regulirati napon i struja na trošilu od 0 do vrijednosti koje višestruko prelaze napon izvora. Teret se njime može i isključiti. Interesantno je također da ovaj čoper invertira napon na trošilu (+ je dolje a – gore, suprotno nago na izvoru E). Kao i u prethodnom primjeru kada se impulsom na upravljačku elektrodu (gate) uključi GTO tiristor on spoji

induktivitet L paralelno izvoru E pri čemu započne prijelazna pojava porasta struje (punjenja induktiviteta). I ovdje to nakon završetka prijelazne pojave predstavlja kratki spoj izvora jer induktivitet ne predstavlja otpor istosmjernoj struji pa prije završetka prijelazne pojave, a u trenutku kada je induktivitet preuzeo dovoljno energije za željeni režim rada tereta treba GTO ugasiti negativnim impulsom na gate. Energija sadržana u magnetskom polju induktiviteta i ovdje nastoji zadržati nepromijenjeni magnetski tok pa nastavlja tjerati istu struju koja se sada više ne može zatvoriti kroz GTO tiristor već je prisiljena teći kuda joj to diode dozvoljavaju. U ovom slučaju je to titrajni krug $L-C-D-L$. Induktivitet predaje energiju kondenzatoru tijekom jedne poluperiode, odnosno dok struja ne padne na 0 kada bi trebala promijeniti smjer, što međutim ne dozvoljava dioda D . Kondenzator se puni na napon koji ovisi o vremenu uključenosti GTO tiristora T . Uz veliki

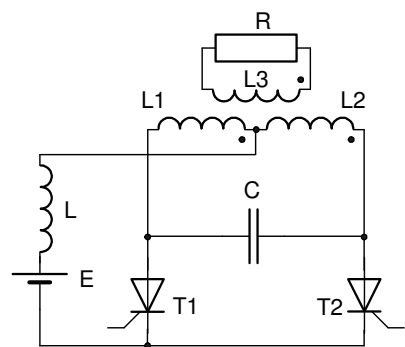
induktivitet zavojnice i relativno mali kapacitet kondenzatora može se dobiti višestruko veći napon od napona izvora, ali istovremeno i vrlo mali napon ako se podesi kratak period vođenja t_V .

IZMJENJIVAČI

37. IZMJENJIVAČI

Izmjenjivači su uređaji energetske elektronike koji pretvaraju istosmjernu električnu energiju u izmjeničnu. Razlikujemo dvije vrste izmjenjivača: izmjenjivače s utisnutom strujom i izmjenjivače s utisnutim naponom. Razlika je u tome što se izmjenjivači s utisnutom strujom napajaju iz istosmjernog strujnog izvora koji se u praksi dobije serijskim spojem velikog induktiviteta koji održava konstantnu struju bez obzira na promjene na istosmjernoj ili izmjeničnoj strani sklopa, dok se izmjenjivači s utisnutim naponom napajaju iz istosmjernog naponskog izvora koji se u praksi dobije paralelnim spojem velikog kondenzatora ili ponekad napajanjem iz akumulatora, koji održavaju konstantan napon bez obzira na promjene na istosmjernoj ili izmjeničnoj strani sklopa.

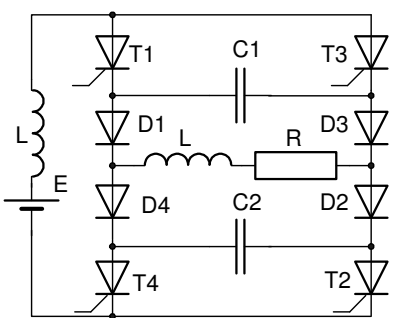
38. IZMJENJIVAČ U SPOJU SA SREDNJOM TOČKOM



Ovaj jednostavni izmjenjivač s utisnutom strujom (induktivitet L) radi tako da naizmjenično uključuje tiristore $T1$ i $T2$ pri čemu struja koja se na teret prenosi preko transformatora mijenja smjer. Kad se uključi $T1$ poteče struja u krugu $E-L-L1-T1-E$. Kako kroz prigušnicu L teče nepromjenljiva istosmjerna struja kojoj induktivitet ne predstavlja otpor na njoj praktički nema pada napona baš kao ni na tiristoru $T1$ (zanemarivi su). To znači da je prvi dio primarnog namota transformatora $L1$ spojen paralelno izvoru i prema tome na njemu vlada napon E , koji se zbog međuinuktiviteta prenosi i na drugi dio primarnog namota $L2$. Zbrojeni ta dva napona daju napon na kondenzatoru

$U_C = 2E$ (+ na anodi $T2$). U međuinuktivnoj vezi je naravno i sekundarni namot $L3$ u kojem se inducira napon koji potjera struju koja kroz teret teče s lijeva na desno (obratite pažnju na točkice). Nakon kratkog vremena, koje odgovara poluperiodi željenog izmjeničnog napona na trošilu, okida tiristor $T2$ i spaja kondenzator C antiparalelno tiristoru $T1$, te se isti reverzno polariziran gasi, a njegovu struju na trenutak preuzima krug $E-L-L1-C-T2-E$ u kome se zbrajaju naponi izvora E i kondenzatora $U_C = 2E$. Nakon brzog pražnjenja kondenzatora struju preuzme krug $E-L-L2-T2-E$, pa se cijela priča ponavlja na drugoj strani: Na $L2$ je napon E , koji se zbog međuinuktiviteta javlja i na $L1$, pa zbrojeni daju napon na kondenzatoru $2E$ (+ na anodi $T1$), koji je čeka spreman za gašenje $T2$. Zbog međuinuktivne veze se na $L3$ inducira napon koji tjera struju kroz teret s desna na lijevo. Treba napomenuti da ukoliko izostane pravovremeno uključivanje tiristora, dolazi do kratkog spoja (induktiviteti ne predstavljaju otpor istosmjernoj struji) koji će ukoliko ne postoji neki oblik zaštite (npr. osigurači) spaliti transformator ili tiristor u radu.

39. MOSNI IZMJENJIVAČ S UTISNUTOM STRUJOM

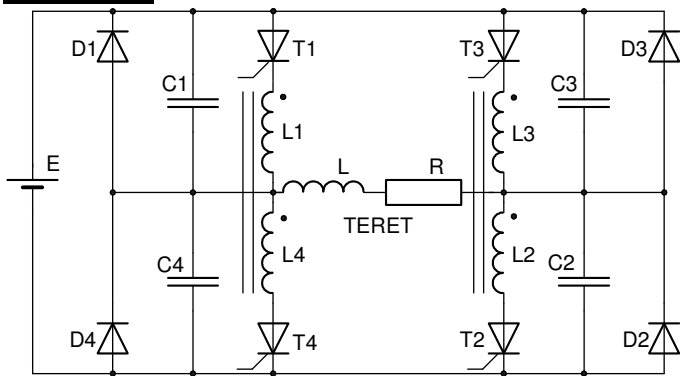


Mosni izmjenjivači imaju karakterističnu osnovnu strukturu u obliku slova H, a čine je glavni upravljivi ili punoupravljivi elektronički ventili po vertikalama (po 2 sa svake strane – ukupno 4) i teret na središnjem horizontalnom dijelu. Ostali elementi su komutacijski ili rezonantni krugovi i pomoćni ventili poluupravljivi ili neupravljivi ventili čija je funkcija da ugase ili olakšaju gašenje glavnih ventila. Struja kroz teret teče diogonalno s lijeva na desno za jednu poluperiodu, a s desna na lijevo za drugu. Prikazani tiristorski izmjenjivač s utisnutom strujom daje na izlazu struju pravokutnog oblika.

Serijski spoj LR predstavlja teret induktivnog karaktera. Prvo istovremeno okidaju tiristori $T1$ i $T2$. Struja teče u krugu $E-L-T1-D1-L-R-D2-T2-E$. Započela je pozitivna poluperioda izmjenične struje na teretu (struja kroz teret LR teče s lijeva na desno). Kondenzator $C1$ se puni u krugu $E-L-T1-C1-D3-D2-T2-E$ na napon izvora $U_{C1} = E$ (+ na katodi $T1$). Pad napona pad napona na L kroz koji teče konstantna istosmjerna struja i padovi napona na elektroničkim ventilima su zanemarivi. Simetrično se na isti napon puni i kondenzator $C2$ u krugu $E-L-T1-D1-D4-C2-T2-E$ na napon izvora $U_{C2} = E$ (- na anodi $T2$). $C1$ je spreman za gašenje $T1$, a $C2$ za gašenje $T2$. Nakon što prođe vrijeme koje odgovara poluperiodi željene frekvencije na teretu uključuju se istovremeno $T3$ i $T4$. $T3$ spaja kondenzator $C1$ antiparalelno tiristoru $T1$ koji je zbog toga reverzno polariziran i gasi se. Isto tako $T4$ spaja kondenzator $C2$ antiparalelno tiristoru $T2$ koji je

zbog toga reverzno polariziran i gasi se. Struju tereta koja zbog induktiviteta i napona na kondenzatorima ne može odmah promijeniti smjer preuzimaju kratkotrajno kondenzatori C1 i C2 pa ona teče u krugu E-L-T3-C1-D1-L-R-D2-C2-T4 u kojem se naponi kondenzatora podudaraju s naponom izvora. Nakon što se kondenzatori isprazne mogu se početi u istom krugu i puniti na drugu stranu. Struja će u navedenom krugu teći sve dok ima energije u induktivitetu tereta. Zbog toga se ovi izmjenjivači projektiraju za točno određeni teret. Teret (elektromotor) većeg induktiviteta bi dulje punio kondenzatore pa bi došlo do njihovog prenapajanja i proboja. Tek kada se sva energija tereta poništi struju preuzimaju diode D3 i D4, da sada struja teče u krugu E-L--T3-D3-R-L-D4-T4-E što znači da je započela negativna poluperioda struje na teretu. Kondenzatori se dopunjavaju na napon E u krugu E-L-T3-C1-D1-D4-T4-E, odnosno E-T3-D3-D2-C2-T4 i spremni su za gašenje T3 i T4 kad dođu impulsi na T1 i T2.

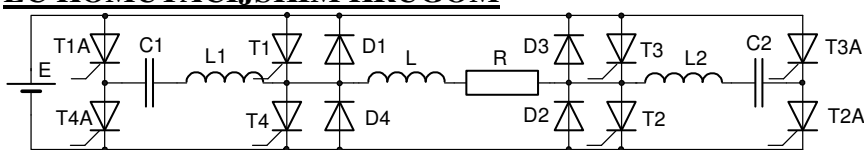
40. MOSNI IZMJENJIVAČ S UTISNUTIM NAPONOM I PARALELNIM LC KOMUTACIJSKIM KRUGOM



Idealni naponski izvor E (veliki kondenzator u praktičnoj izvedbi) osigurava konstantan napon tijekom rada izmjenjivača (komutacije tiristora). Ovaj izmjenjivač daje na teretu pravokutni napon. Prije početka rada kondenzatori su napunjeni na $E/2$ (kapacitivno naponsko dijelilo). Najprije okidaju T1 i T2. Struja teče u krugu: E-T1-L1-L-R-L2-T2-E. Započela je pozitivna poluperioda napona na teretu. Kondenzatori C1 i C2 su kratko spojeni preko T1-L1 odnosno T2-L2 pa se isprazne $U_{C1}=U_{C2}=0$. Kondenzator C4 se puni u krugu E-T1-L1-C4-E na napon $U_{C4}=E$

(padovi napona na T1 i L1 su zanemarivi). Simetrično se C3 u krugu E-C3-L2-T2-E puni na isti napon. Nakon što prođe vrijeme koje odgovara poluperiodi željene frekvencije na teretu dovedu se impulsi na tiristore T3 i T4 koji istovremeno provedu. T4 spaja C4 paralelno L4 pa je napon na L4 jednak naponu C4 odnosno $U_{L4}=U_{C4}=E$. Ovaj se napon zbog međuinuktiviteta inducira i u namotu L1. Zbrojeni U_{L1} i U_{L2} daju napon $2E$. Analizira li se petlja E-T1-L1-L4-T4-E (II Kirchhoffov zakon) dobije se da je T1 reverzno polariziran naponom E ($U_{T1} = -E$), te se stoga gasi. Na analogan način se pomoću kondenzatora C2 i međuinuktiviteta L3 i L4 gasi i T2. Iako su se T1 i T2 ugasili struja tereta zbog njegovog induktiviteta ne može trenutno promijeniti smjer pa i dalje teče s lijeva na desno i to u krugu E-C1-L-R-C2-E pri čemu se pune kondenzatori C1 i C2. Magnetska energija sadržana u protjecanju struje kroz induktivitet L1 se trenutno preseli na struju kroz induktivitet L4 jer su isti međuinuktivno povezani odnosno namotani na istu jezgru. Ta struja ubrzava pražnjenje kondenzatora C4 u titrajnom krugu C4-L4-T4 koje je započelo još kada se upalio T4. Kada se kondenzator C4 isprazni ostatak energije titrajnog kruga koja je u tom trenutku sadržana u struji namota L4 se isprazni kroz diodu D4 koja je upravo postala propusno polarizirana (kondenzator C4 ju je do tada držao u zapornom području A+ K-), dakle u krugu L4-T4-D4 i izgubi se u gubicima, a tiristor T4 se nakon što mu struja padne na nulu ugasi. Analogno se ponaša simetrično postavljeni titrajni krug C3-T3-L3 i dioda D3 pa se gasi i tiristor T3. Nakon što provedu diode D4 i D3 teret može početi vraćati energiju istosmjernom izvoru u krugu E-D4-L-R-D3-E. To znači da ne može doći do prenapajanja kondenzatora C1 i C2 pa ovaj izmjenjivač baš kao i svi izmjenjivači s utisnutim naponom ne mora biti prilagođen trošilu (motoru) kao što je to bio slučaj kod izmjenjivača s utisnutom strujom, već štoviše može napajati i višemotorne pogone. Kada se energija sadržana u magnetskom polju tereta potroši (vрати u istosmjerni izvor – u praksi kondenzator) sklop miruje sve dok mu se ne dade nove impulse na tiristore T3 i T4 čime započinje negativna poluperioda napona na teretu odnosno struja kroz teret konačno poteče s desna na lijevo. Zbivanja u negativnoj poluperiodi su analogna zbivanjima u pozitivnoj.

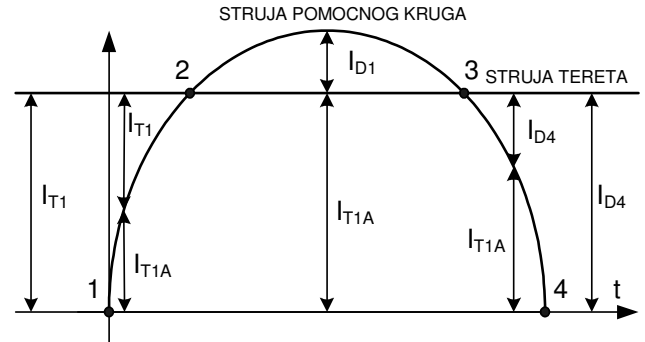
41. MOSNI IZMJENJIVAČ S UTISNUTIM NAPONOM POMOĆNIM TIRISTORIMA I SERIJSKIM LC KOMUTACIJSKIM KRUGOM



izmjenjivač daje na teretu pravokutni ili širinsko impulsno modulirani napon. Prije početka rada kondenzatori su napunjeni na $E/2$ (kapacitivno naponsko dijelilo). Najprije okidaju T1 i T2. Struja teče u krugu E-T1-L-R-T2-E. Kada dođe trenutak za prekidanje struje uključuje se pomoćni tiristori T1A i T2A (točka 1). Titrajni krug

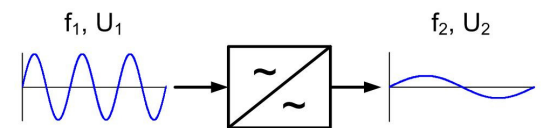
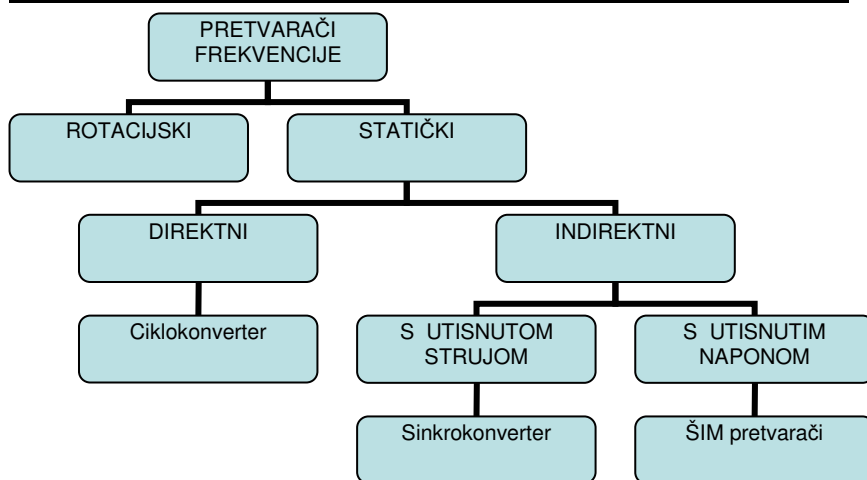
Idealni naponski izvor E (veliki kondenzator u praktičnoj izvedbi) osigurava konstantan napon tijekom rada izmjenjivača (komutacije tiristora). Ovaj izmjenjivač

E-T1A-C1-L1-L-R-L2-C2-T2A-E započinje oscilirati. Sinusoidalna struja tog komutacijskog kruga ima oblik sinusoide. Induktivni teret (L-R) ne dozvoljava značajniju promjenu svoje struje tijekom kratkotrajne komutacije tiristora. Zbog toga struja titrajnog kruga $I_{T1A}(I_{T2A})$ povećavajući se oduzima sve više struje glavnim tiristorima T1 i T2 sve dok njihove struje u trenutku 2 ne padnu na nulu pri čemu se isti ugase. Struje pomoćnih tiristora nastavljaju rasti, ali teret ne prihvaća dodatnu struju već se ona zatvara preko diode D1 u krugu T1A-C1-L1-D1-T1A (odnosno diode D2 u krugu T2A-D2-L2-C2-T2A). Nakon što je dostigla maksimum struja pomoćnih (komutacijskih) titrajnih krugova počne padati i kada postane manja od struje tereta (trenutak 3) postane premala da bi zadovoljila potrebe induktivnog tereta L-R koji zbog toga trošeći vlastitu energiju akumuliranu u magnetskom polju potjera dodatnu struju kroz diode D4 i D3 u krugu E-D4-L-R-D3-E koja vraća energiju iz tereta u izvor. Kada u trenutku 4 struja pomoćnih tiristora I_{T1A} i I_{T2A} padne ispod struje držanja isti se ugase, pa nakon toga kroz diode D3 i D4 teče cjelokupna struja tereta koja se trošeći energiju tereta sa stanovišta vremenske konstante komutacijskog kruga polako, a sa stanovišta izlazne frekvencije izmjenjivača vrlo brzo smanjuje. Kada se energija tereta potroši može se uključiti glavne tiristore T3 i T4 koji će propustiti struju kroz teret u suprotnom smjeru i tako započeti negativnu poluperiodu izlaznog napona ili u slučaju širinsko impulsne modulacije (ŠIM) nakon programirane pauze ponovno uključiti glavne tiristore T1 i T2 za sljedeći impuls unutar pozitivne poluperiode. Ponašanje sklopa u negativnoj poluperiodi je analogno ponašanju u pozitivnoj.



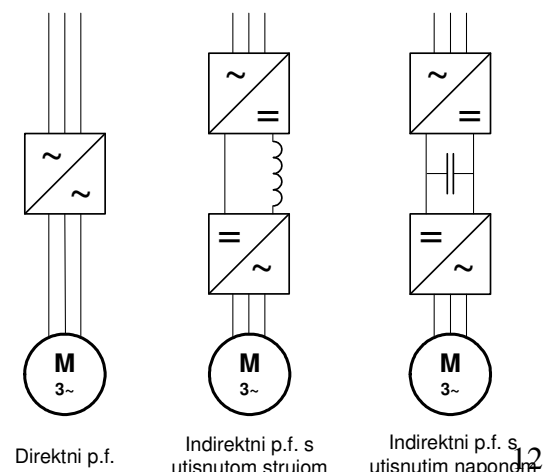
PRETVARAČI FREKVENCIJE

42. DEFINICIJA I VRSTE PRETVARAČA FREKVENCIJE



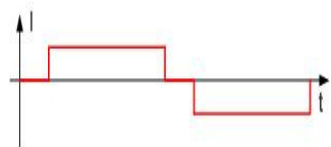
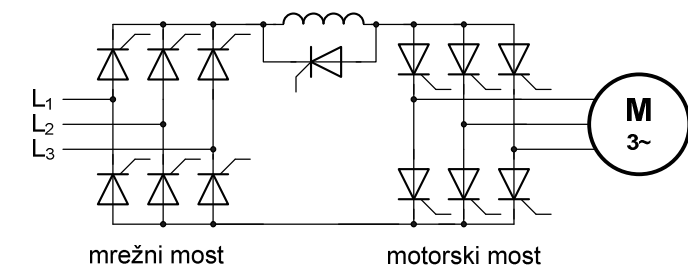
Rotacijski pretvarači frekvencije se više ne koriste a sastojali su se od sinkronog generatora pogonjenog motorom sa ili bez mogućnosti regulacije brzine, pa su uz različiti broj polova generatora i motora ili regulacijom broja okretaja davali na izlazu napon različite vrijednosti i frekvencije od onog na ulazu. **Statički pretvarači frekvencije** su uređaji energetske elektronike koji na izlazu daju

napon i frekvenciju druge vrijednosti od ulaznog napona i frekvencije a koje je u pravilu moguće i regulirati. Pretvarači frekvencije se dijele na **direktne**, koji nemaju značajnih vlastitih skladišta energije (kondenzatora ili induktiviteta) i izmjeničnu struju i napon dobiven iz mreže direktno pretvaraju u izmjeničnu struju i napon na izlazu i **indirektne** koji izmjeničnu električnu energiju dobivenu na ulazu najprije isprave pomoću ispravljača, zatim je pomoću vlastitih skladišta energije u istosmjernom međukrugu stabiliziraju (zbog toga se još nazivaju i **pretvarači frekvencije s istosmjernim međukrugom**), da bi je na kraju pomoću izmjenjivača ponovo pretvorili u izmjeničnu struju i napon, ali druge frekvencije i vrijednosti. Zavisno od toga da li u istosmjernom međukrugu velikom prigušnicom stabiliziraju struju ili velikim kondenzatorom napon zovu se **indirektni pretvarači frekvencije s utisnutom strujom** ili **indirektni**



pretvarači frekvencije s utisnutim naponom. Najznačajniji predstavnik pretvarača s utisnutom strujom je **sinkrokonverter**, pretvarača s utisnutim naponom **širinsko-impulсно modulirani (ŠIM) pretvarači** frekvencije, a direktnih pretvarača frekvencije **ciklokonverter**.

43. SINKROKONVERTER



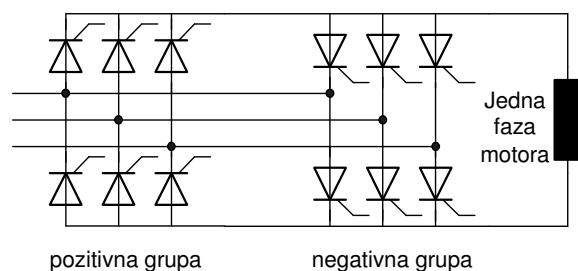
Sinkrokonverter je posebna vrsta pretvarača frekvencije s utisnutom strujom kod kojega tiristori „izmjenjivača“ komutiraju (kada se jedan impulsom upali preuzme struju od onoga koji je prije njega vodio pa se taj ugasi) mrežnom komutacijom zahvaljujući induciranom naponu sinkronog stroja koji mu predstavlja teret. Zbog toga se još naziva i pretvarač s utisnutom strujom komutiran teretom (LCI – Load Commutated Inverter).

Sinkrokonverter je sastavljen od dva trofazna tiristorska ispravljača - **mrežnog i motorskog mosta** - koji su na istosmjernoj strani spojeni preko prigušnice. Izmjenična strana **mrežnog mosta** spojena je na mrežu, a **motorskog mosta** na sinkroni stroj kojim se upravlja. „Izmjenjivač“ odnosno motorski most je dakle običan trofazni tiristorski most u izmjenjivačkom režimu rada koji u **sinkronom režimu rada** komutira zahvaljujući trofaznom naponu induciranom na sinkronom stroju bez kojega ne može raditi. Sinkrokonverter dakle mora na sekundaru imati priključen sinkroni stroj zahvaljujući kojem je izlazni napon sinusoidalni. Sinkrokonverter omogućuje četverokvadratni elektromotorni pogon što znači da može raditi u motorskom i generatorskom (kočenje) režimu rada u oba smjera vrtnje. Tijekom motorskog rada mrežni most radi u ispravljačkom, a motorski u izmjenjivačkom režimu rada, a tijekom generatorskog kočenja obratno. Sinkrokonverter spada u indirektno pretvarače frekvencije s utisnutom strujom pa je struja u istosmjernom međukrugu zahvaljujući velikom induktivitetu prigušnice praktički konstantna. Mrežni i tiristorski most tu struju sukladno željenoj frekvenciji i smjeru vrtnje prema predviđenom redoslijedu okidanja tiristora samo kanaliziraju na odgovarajuće dvije faze mrežnog priključka odnosno sinkronog motora, dok je treća faza bez struje. Mrežna i motorska struja su stoga pravokutnog oblika što nije dobro niti za mrežu niti za motor.

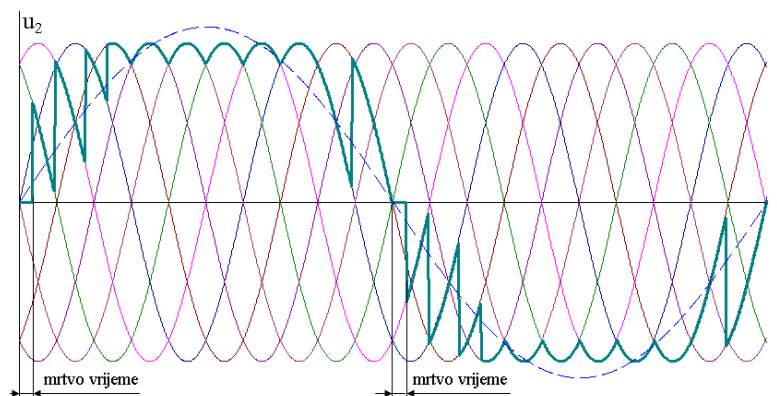
Kod pokretanja i pri malim brzinama (do 10% nazivne brzina) priključenog sinkronog motora induciranog napona na njemu nema ili je premali da bi omogućio mrežnu komutaciju tiristora motorskog mosta. U takvim uvjetima sinkrokonverter mora s normalnog sinkronog režima rada preći na **pulsni režim rada** što znači da istosmjerna struja koja kroz istosmjerni međukrug prelazi s mrežnog na motorski most više nije konstantna već postaje isprekidana. Naime, da bi se ugasio motorski most moraju se prekidom svih upravljačkih impulsa najprije ugasi svi tiristori mrežnog mosta i uključiti shunting tiristor koji kratko spaja prigušnicu i tako omogućuje nesmetan protok njene struje, odnosno očuvanje energije, čime se jako skraćuje vrijeme potrebno za gašenje tiristora motorskog mosta. Tiristori motorskog mosta se tada ostavši bez struje ugaše, pa se može ponovno uključiti mrežni most i sljedeća dva tiristora motorskog mosta.

Sinkrokonverteri se na brodu koriste kao pretvarači frekvencije kod osovinskog generatora i kao propulzijski pretvarači frekvencije na brodovima s električnim porivom najvećih snaga. Prednosti sinkrokonvertera su: velika snaga, četverokvadratni pogon, jednostavnost (nema komutacijskih krugova ni pomoćnih ventila), mali broj ventila. Nedostatci su: pravokutna ulazna i izlazna struja, rade samo sa sinkronim motorima, pulsni režim rada kod pokretanja i malih brzina,

43. CIKLOKONVERTER



Ciklokonverter je direktni pretvarač frekvencije koji izlazni napon gradi iz segmenata ulaznog napona. Trofazni ciklokonverter ima tri grane.



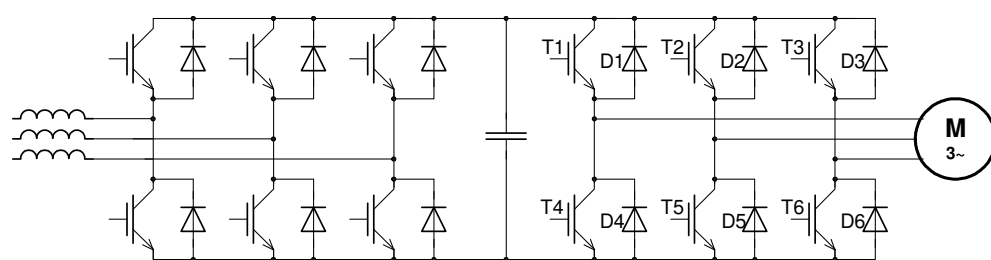
Svaka grana napaja jednu fazu a sastavljena je od po dva antiparalelno spojena tiristorska ispravljačka mosta koji se nazivaju **pozitivna i negativna grupa**. Tijekom pozitivne poluperiode izlaznog napona uključena je pozitivna grupa dok je negativna grupa bez upravljačkih impulsa dakle isključena. Kako bi izlazna struja i napon analitički gledano bili (Fourierova analiza – viši harmonici) što sličniji sinusoidi tiristori ispravljača



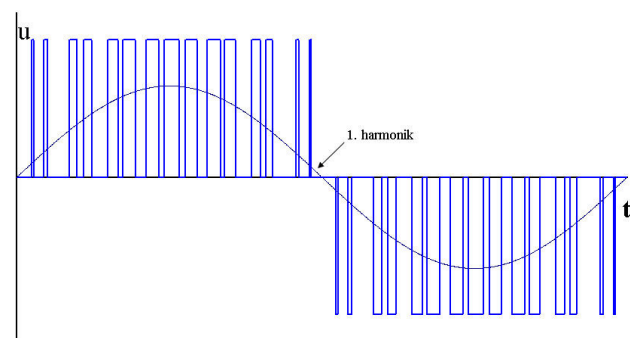
nemaju konstantan kut vođenja već se on neprestano mijenja i unutar jedne poluperiode izlaznog napona. Postoje dvije vrste ciklokonvertera: ciklokonverter u bloknom spoju i ciklokonverter s kružnom strujom. Kod ciklokonvertera u bloknom spoju mora se pri prelasku iz npr. pozitivne poluperiode izlaznog napona u negativnu najprije ugasiti pozitivna grupa i zatim pričekati jedno određeno tzv. mrtvo vrijeme i tek onda početi s paljenjem tiristora negativne grupe, jer bi istovremeni rad pozitivne i negativne grupe značio kratki spoj.

Nasuprot tome ciklokonverteri s kružnom strujom imaju u istosmjernom krugu prigušnice koje dozvoljavaju istovremeni rad obje grupe ograničavajući struju kratkog spoja na prihvatljivu vrijednost. Maksimalna izlazna frekvencija ciklokonvertera nije viša od trećine ulazne frekvencije pa se koriste za teške sporohodne pogone. Na brodu se ciklokonverteri koriste kao propulzijski pretvarači frekvencije na brodovima s električnim porivom velikih snaga. Ciklokonverter omogućuje rad elektromotornog pogona u sva četiri kvadranta, a može se koristiti uz sinkrone ali i asinkrone motore. Kako nema vlastitih skladišta energije ulazna struja ciklokonvertera je izuzetno nepravilnog oblika i jako ovisna o broju okretaja i opterećenju motora, jer se sve promjene u izlaznoj struji direktno prenose na ulaznu struju. Izobličenja koja takva struja stvara u mrežnom naponu nije moguće potpuno filtrirati pasivnim filtrima.

44. ŠIRINSKO-IMPULSNO MODULIRANI (ŠIM) PRETVARAČI FREKVENCije



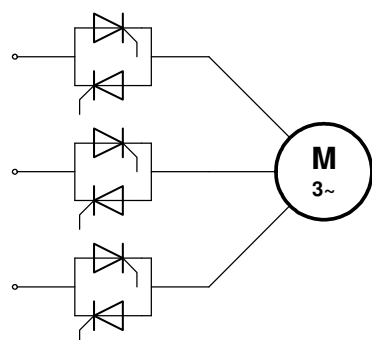
ŠIM (PWM) pretvarači frekvencije su indirektni pretvarači frekvencije s utisnutim naponom. Konstantan napon u istosmjernom međukrugu osigurava veliki kondenzator. Ispravljač može biti aktivni (slika) ili diodni.



Diodni ispravljač omogućuje samo dvokvadratni pogon (motorski rad u oba smjera), dok aktivni ispravljač daje mogućnost punog četverokvadratnog rada. Izmjenjivač je uvijek izveden s punoupravljivim elektroničkim ventilima, danas uglavnom IGCT ili IGBT. Oni sjećaju istosmjerni napon kako bi se na izlazu dobila približno sinusoidalna struja. Punoupravljivi ventili se uključuju po dva istovremeno. Kada se ti glavni ventili isključe induktivnu struju motora preuzimaju diode koje energiju vraćaju u istosmjerni krug. Npr. nakon što su se ugasili T1 i T2 struja

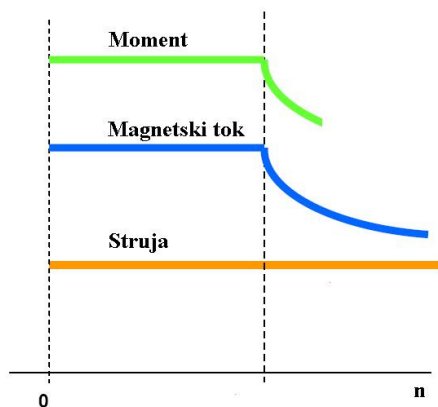
teče u krugu C-D4-MOTOR-D2-C sve dok T1 i T2 ponovno ne provedu. Prednosti ŠIM pretvarača frekvencije su: Mala težina i volumen, gotovo sinusoidalna struja motora i $\cos\phi=1$ (prema mreži) kod svih opterećenja bez obzira na izvedbu ispravljača. Nedostaci su: još uvijek visoka cijena, nagle promjene napona na motoru (du/dt) koje opterećuju njegovu izolaciju, gubici prekapčanja.

45. TIRISTORSKI UPUTNIK



Tiristorski uputnik (Soft starter) ima tri para antiparalelno spojenih tiristora koji napajaju tri faze motora. Umjesto punog sinusoidalnog napona motor napajan iz tiristorskog uputnika dobiva smanjeni napon zbog kasnijeg paljenja tiristora. Na početku zaleta tiristori okidaju s velikim kutem vođenja pa do motora dolazi vrlo mali napon. Kako se motor ubrzava tiristori okidaju sve ranije sve dok kod pune brzine motora ne počnu okidati bez kašnjenja (kut vođenja $\alpha=0$)

46. UPRAVLJANJE IZMJENIČNIM MOTORIMA POMOĆU PRETVARAČA FREKVENCije

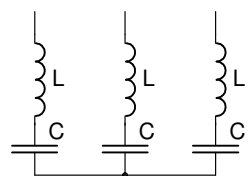


Pretvarači frekvencije daju asinkronim i sinkronim motorima karakteristike upravljanja jednake onima kod istosmjernih motora. Istovremenom promjenom napona i frekvencije po načelu konstantnog magnetskog toka $\Phi \approx U/f = \text{konst.}$ postiže se konstantan maksimalni moment u području brzina do nazivne. Kod viših brzina magnetski tok i moment padaju jer se napon više ne može povećavati i pratiti povećanje frekvencije. Motori startaju mekano s konstantnom nominalnom strujom i potpunom kontrolom brzine. Velikim sinkronim motorima je prije pokretanja potrebno točno odrediti položaj rotora. Nedostatak su povećani gubici u željezu zbog nesinusoidalnog napona te povećani gubici u bakru zbog nesinusoidalne struje. Javljaju se također povećane vibracije i buka. Ukoliko se vibracije poklope s vlastitom frekvencijom motora dolazi do naizgled neobjašnjivog pucanja osovine.

47. VIŠI HARMONICI

Viši harmonici su efektivne vrijednosti sinusoida čije su frekvencije višekratnici (uglavnom neparni) osnovne frekvencije nesinusoidalnog napona i struje, a dobiju se razvojem nesinusoidalne periodičke funkcije (struje, napona) u Fourieov red. Visoke vrijednosti viših harmonika ukazuju na lošu kvalitetu električne energije. Vrijednosti viših harmonika uglavnom padaju s njihovim redom (višekratnikom osnovne frekvencije) pa su najopasniji oni najniži (3., 5., 7., 11., 13.). Upravo se ti viši harmonici u jako prigušuju i u idealnom slučaju eliminiraju primjenom ispravljača s većim pulsni brojem (12, 18, 24). Treba razlikovati probleme izobličenja struje na motorskoj strani pretvarača koji su posljedica rada izmjenjivača od izobličenja mrežne struje koje je posljedica rada ispravljača. Izobličenje mrežne struje je nezgodno jer izaziva pojavu nesinusoidalnog pada napona na reaktanciji generatora i transformatora, što ima za posljedicu pojavu nesinusoidalnog napona mreže odnosno viših harmonika napona. Mjere za smanjenje harmoničkog izobličenja mrežnog napona su: korištenje pretvarača (ispravljača) s većim pulsni brojem, korištenjem aktivnih ispravljača, povećanjem rasipne reaktancije transformatora pretvarača frekvencije, smanjenjem početne reaktancije generatora, ugradnjom prigušnice, ugradnjom pasivnih i aktivnih filtara.

48. PASIVNI HARMONIČKI FILTRI



Pasivni filtri su serijski spojevi kondenzatora i prigušnice kojima je rezonantna frekvencija podešena tako da odgovara frekvenciji harmonika napona koji se želi prigušiti (eliminirati). Impedancija pasivnog filtra je na rezonantnoj frekvenciji (frekvenciji određenog višeg harmonika) minimalna tako da filter za taj harmonik predstavlja kratki spoj. Napon tako filtriranog višeg harmonika jednak je umnošku njegove impedancije ($Z_h \approx 0$) i struje višeg harmonika I_h koja kroz njega teče. Obično se spajaju po tri takva filtra kako bi se prigušilo tri najznačajnija viša harmonika (5., 7., i 11.) što ih stvaraju pretvarači frekvencije.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$Z_h = \sqrt{(X_L - X_C)^2 + R^2}$$

49. AKTIVNI HARMONIČKI FILTRI

Aktivni harmonički filtri su u biti aktivni ispravljači koji na istosmjenoj strani nemaju tereta već samo skladište energije odnosno kondenzator. Oni mjere struju generatora ili transformatora koji napajaju dio mreže koji se želi očistiti od viših harmonika napona i vlastitom strujom je korigiraju kako bi se što više približila sinusoidalnom obliku. Snaga filtra ovisi o veličini harmoničkih struja koje stvara nelinearna potrošnja. Aktivni ispravljači suvremenih ŠIM pretvarača frekvencije mogu se koristiti i kao aktivni filtri ukoliko im je snaga dovoljna da savlada harmoničko izobličenje struje u sustavu. Kvaliteta rada odnosno izobličenje filtrirane struje ovisi o frekvenciji rada (prekapčanja) aktivnog filtra. S višom frekvencijom se postiže bolja kvaliteta energije ali je to povezano i s većim gubicima prekapčanja punoupavljljivih ventila aktivnog filtra.