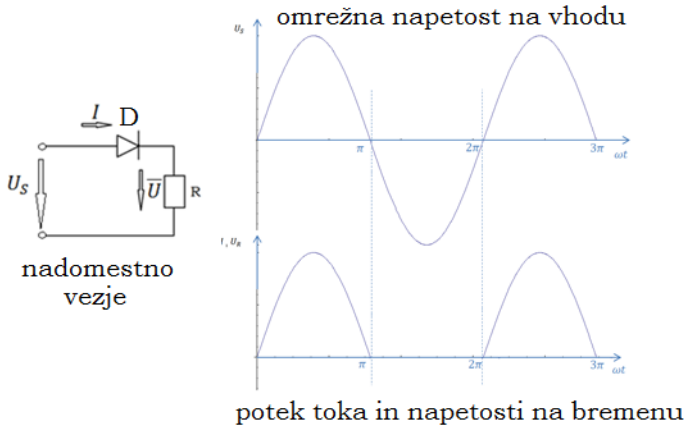


STROMAR⁵

Enačbe in lastnosti tokokrogov v EE

Enofazni enopolzni usmernik z ohmskim bremenom



Osnovna naloga: pretvarjanje izmenične napetosti vira U_S v enosmerno napetost.

Potek toka na bremenu (velja za eno periodo velja (od 0 do 2π):

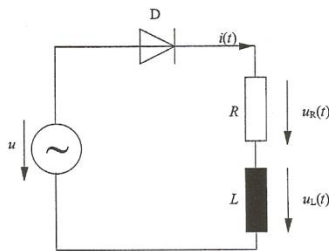
$$i(t) = \frac{\hat{U}_S \sin(\omega t)}{R}, \quad 0 \leq \omega t \leq \pi$$

$$i(t) = 0, \quad \pi \leq \omega t \leq 2\pi$$

Usmerjena napetost na bremenu:

$$\bar{U}_R = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \hat{U}_S \sin(\omega t) d\omega t = \frac{\hat{U}_S}{\pi}$$

Enofazni enopolzni usmernik z ohmsko-induktivnim bremenom



Slika: Diodni usmernik z ohmsko-induktivnim bremenom

Ko dioda prevaja je na nje napetost:

$$u_0 = \hat{U}_S \sin(\omega t) = Ri + L \frac{di}{dt}$$

in tok njen po predhodni izpeljavi:

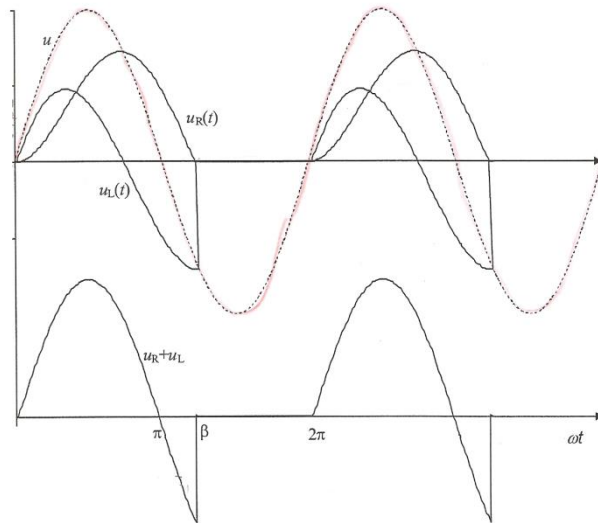
$$i(t) = \frac{\hat{U}_S}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \left[\sin(\omega t - \varphi) + (\sin \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \right]$$

Pri čemer je

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$$

Tok zaostaja za napetostjo.

Ko gre napetost skozi nič $\hat{U}_S = 0$, tok ne neha teči. Da tok ne teče, najdemo glavnega krivca v nakopičeni energiji v dušilki. Sedaj postane dušilka začasen generator (v njen se namreč inducira napetost), ki je v tej vlogi, dokler ni padec na ohmski upornosti enak napajalni napetosti \hat{U}_S .



Dušilka omogoča prevajanje diode, dokler se ne razmagnetni energija

$$W_L = \frac{1}{2}LI^2 = 0.$$

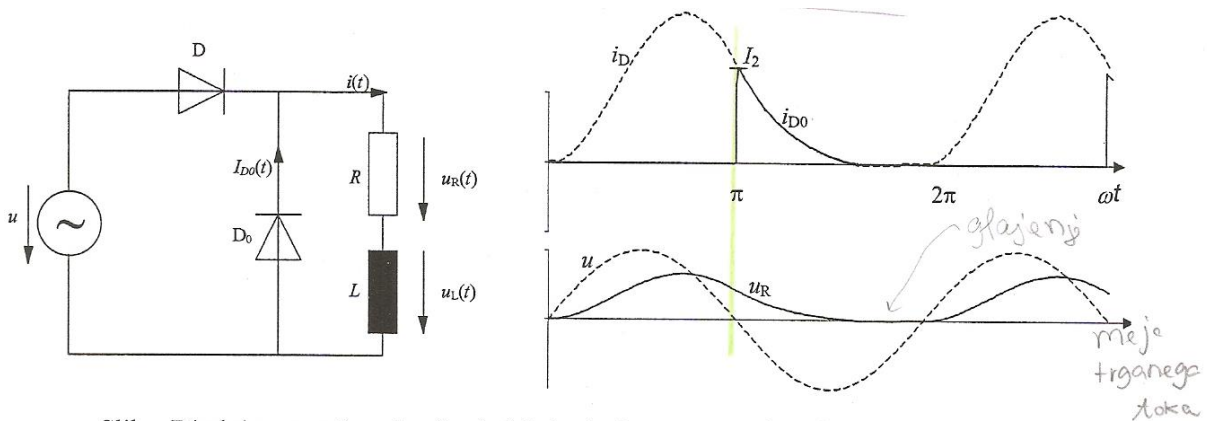
To se kaže kot podaljšan kot prevajanja.

Usmerjena srednja vrednost izhodne napetosti je tako:

$$\bar{U}_{RL} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\beta \hat{U}_S \sin(\omega t) d\omega t$$

Enofazni enopolzni usmernik z ohmsko-induktivnim bremenom in prostotečno diodo.

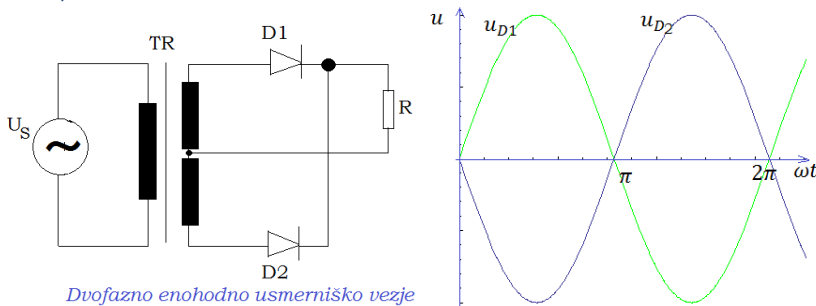
Prostotečna dioda zvišuje usmerjeno srednjo vrednost izhodne napetosti usmernika.



Slika: Diodni usmernik z ohmsko-induktivnim bremenom: a) vezje, b) potek veličin

Dvofazni enohodni usmernik:

a) Ohmsko breme



Dvofazno enohodno usmerniško vezje

$$u = \begin{cases} u_{D1}; 0 \leq \omega t \leq \pi \\ u_{D2}; \pi \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases}$$

Srednja vrednost usmerniške napetosti:

$$\bar{U} = 2 \cdot \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \hat{U}_S \sin(\omega t) d\omega t = 2 \cdot \frac{\hat{U}_S}{\pi}$$

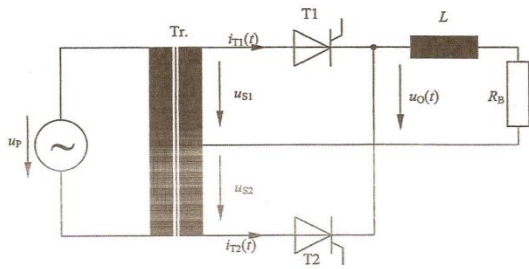
$$\hat{U}_S = \sqrt{2}U_S \rightarrow \bar{U} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}U_S = 0.9U_S$$

b) Induktivno breme

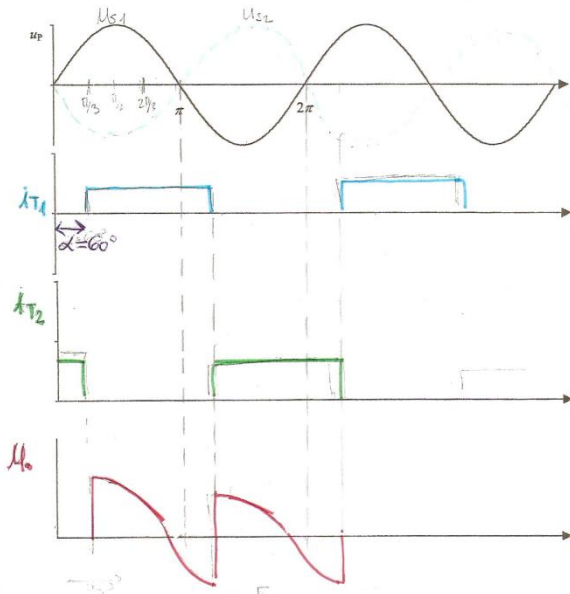
V tem primeru je **tok dušilke konstanten** zaradi česa se prevajanje predhodno sproženega tiristorja podaljša vse do trenutka, ko sprožimo tiristor v sosednji tokovni veji.

Usmerjena vrednost izhodne napetosti:

$$\bar{U}_\alpha = \frac{1}{\pi} \int_\alpha^{\pi+\alpha} \hat{U}_S \sin(\omega t) d\omega t = \frac{\hat{U}_S}{\pi} (2 \cos \alpha) = \bar{U}_0 \cos \alpha$$



Slika: Shema RL breme



ENAČBE:

Srednja vrednost izhodne napetosti: $\bar{U}_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u_R(t) dt$

Srednja vrednost izhodnega toka: $\bar{I}_0 = \frac{\bar{U}_0}{R}$

Efektivne vrednosti U in I periodične funkcije: $U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u_R(t))^2 dt}$, $I_{ef} = \frac{U_{ef}}{R}$

Faktor oblike: merilo za obliko izhodne napetosti: $FF = \frac{U_{ef}}{\bar{U}_0}$

Faktor valovitosti: $\frac{\Delta I}{\bar{I}}$

Povprečna izgubna moč: $P_T = \frac{1}{T} \int_0^T (U_0 + r_T i_T) i_T dt = U_0 \bar{I} + r_T I_{ef}^2$

Transientna toplotna upornost: $Z_{tr} = \sum_{n=1}^{n=m} R_n \left[1 - e^{-\frac{1}{\tau_n}} \right]$

Končna temperatura: $\vartheta_S = P \cdot \sum_{n=1}^{n=m} R_n \left[1 - e^{-\frac{1}{\tau_n}} \right]$

Delovna moč: $P = U_{ef} \cdot I_{ef}$

Nazivna moč: $S = U_S \cdot I_{ef}$

Faktor moči: $\cos \varphi = \frac{P}{S}$

Harmonska analiza toka: $i(t) = \bar{I} + \sum_{v=1}^n (a_v \cos \omega t + b_v \sin \omega t) = \bar{I} + I_{\sim}$

$\bar{I} = \frac{1}{T} \int_0^T i(\omega t) d\omega t$, $a_v = \frac{2}{T} \int_0^T i(\omega t) \cos \omega t d\omega t$, $b_v = \frac{2}{T} \int_0^T i(\omega t) \sin \omega t d\omega t$,

$$c_v = \sqrt{a_v^2 + b_v^2}$$



POVZETEK TEORIJE

VZP IN ZAP VEZAVA TIRISTORJEV: Pri zaporedni vezavi tiristorjev je važna enakomerna porazdelitev zaporne napetosti, tako v zaporni kot v prevodni smeri. Zaradi neenakomerne diferencialne upornosti karakteristik je enakomerna porazdelitev napetosti skoraj nemogoča. Pomenbno je tudi, da vsi tiristorji vžgejo hkrati. To rešujemo tako, da ima vžigni impulz čim večjo tokovno strmino. Paralelno vezavo uporabljamo, ko so zahteve po večjih tokih. Tiristor s krajšim zakasnilnim časom td vžge prej in prevzame nase ves tok preko bremena, kar je lahko usodno. S hitrimi varovalkami, s katerimi varujemo vsak tiristor zase, lahko te poškodbe preprečimo, še bolj pa je, da se tiristorji vklaplajo prek dušilke, ki z L/R konstanto preprečuje hitro naraščanje toka. Vžigni impulzi, morajo imeti čim večjo strmino naraščanja toka, zaradi hkratnega vžiganja tiristorjev.**STATIČNA KARAKT. TIRISTORJA:** 0-1 = zapiranje v prevodni smeri; 1-2 = Avalanche efekt; 2-4 = Področje negativne upornosti; 3-5= Področje prevajanja;4-5= Normalno delovno področje; 5= Maksimalna točka glede segrevanja; 6-7= Avalanhev preboj, 3= specifična točka (če tok pade pod to vrednost, tiristor vgasne)**DINAMIČNA KARAKT. TIRISTORJA:** Ko nastopi vžigni impulz, preteče določen zakasnilni čas td, da začne bremenski tok naraščati. Ko le ta naraste na 90% nominalne vrednosti, smatramo, da je tiristor vžgal, za kar potrebuje vžigalni čas ton. S padanjem napajalne napetosti, pada tudi bremenski tok. Ko postane anoda negativna, še teče nekaj časa tok v rezervni smeri (ts). Razlog so nakopičeni nosilci elektrine v vseh 4. plasteh. Po času ts je tiristor pripravljen zapirati v prevodni smeri. Po času toff je tiristor sposoben zapirati tudi v prevodni smeri. Ta čas je povezan s strmino du/dt ponovnega naraščanja napetosti v prevodni smeri in je za večje du/dt večji. Strmina toka di/dt je pomenbna za elektriške izgube ventila.

ZMANJŠANJE JALOVE MOČI:

Z večanjem kota zakasnitve vžiga, se zmanjša usmerjena napetost, s tem pa se večja jalova moč in jalova komponenta omrežnega toka. Med uspešne načine zmanjšanja krmilne jalove moči štejemo: zaporedno krmiljenje, nično diodo, nesimetrično krmiljenje, trafo z odcepi in prisilno komutacijo. **Zaporedno krmiljenje:** je najpomembnejši način zmanjšanja jalove moči. Osnova je v zap vezavi dveh ali več krmiljenih sistemov, ki jih krmilimo tako, da manjšamo usmerjeno napetost najprej pri 1. sistemu z večanjem kota zakasnitve vžiga α in obdržimo 2. sistem nekrmiljen. Ko smo 1. sistem izkrmilili do α_{max} , začnemo krmiliti 2. Nekrmiljeni sistem v omrežju ne povzroča jalove komponente, krmiljeni pa odvisno od α . Že pri dveh zap. Vezanih krmiljenih sistemih zmanjšamo na ta način jalovo moč za 50%, če sta 1 in 2 grajena za enako nazivno usmerjeno moč. Zap. Krmiljenje zahteva specialno izvedbo impulzne vžigne naprave, s katero je možno α nastavlјati za vsak ventil posebej. Najbolje je, če ima vsak ventil svojo impulzno napravo. Imuplzne naprave so drage, če pa računamo prihranek jalove moči, je zap. Krmiljenje ekonomsko opravičeno že pri sistemih grajenih za nazivne

moči nekaj kW. **Nična dioda:** je dioda priključena na izhod krmiljenega usmernika z gladilno dušilko, tako da je polarizirana v zaporni smeri. Namen te diode je, da prevzame enosmerni tok potem, ko preide fazna napetost katere ventil prevaja nično vrednost. V vezju brez nične diode, ki ima dovolj veliko gladilno dušilko, prevaja ventil v fazi pe potem, ko je njena napetost obrnila polariteto, ker je inducirana napetost dušilke prevzela vlogo generatorja.

Asimetrično krmiljenje: Pri tro pulznem krmiljenem sistemu, kateri v normalnem obratovanju deluje tako, da vsak ventil prevaja 120° el. Pri asimetričnem krmiljenju pa izpustimo vsako drugo fazo, zato ventil prevaja 240° el, nato pa je $2 \times 240^\circ$ el zaprt. Asimetrično krmiljenje z izpuščanjem vsake faze, da polovično vrednost usmerjene napetosti, kadar ni zakasnitve vžiga ventilov. Izmenični tok v omrežju je v fazi z napetostjo, kadar le ta obstaja. Posledica tega je, da pri polovični napetosti ni jalove komponente omrežnega toka oz. moči. Najugodnejše razmere krmilne jalove moči asimetričnega krmiljenja so v področju 50%-ne nazivne napetosti. Usmerjena napetost asimetričnega sistema ima osnovno harmonsko, ki je za $\frac{1}{2}$ nižjo os osnovne harmosnke v normalnem krmiljenju. **Trafo z odcepi:** Osnova zmanjšanja krilne jalove moči je v zmanjšanju α . Če se manjpa srednja vrednost usmerjene napetosti, se proporcionalno temu večja krmilna jalova moč. S trafotom z odcepi lahko krmilimo usmerjeno napetost s pomočjo krmiljenega sistema pri vsakem odcepu do tiste vrednosti usmerjene napetosti, ki je enaka usmerjeni napetosti naslednjega nižjenapetostnega odcepa brez zakasnitve vžiga. Z večanjem števila odcepov dosežemo zmanjšanje krmiljene jalove moči. Namesto trafota z odcepi lahko uporabimo variac. **Prisilna komutacija:** s prisilno komutacijo – ugasnitev krmiljenega ventila lahko popolnoma odpravimo krmilno jalovo moč. V kombinaciji s prisilno komutacijo moramo vedno uporabljati tudi nično diodo, ker je zmanjšanje krmilne jalove moči s prisilno komutacijo uporabno le za usmernik, na pa tudi za razsmernik. **TOKOVNI UDARCI:** Omrežno krmiljen razsmernik mora biti z omrežjem sinhroniziran. Razsmerniško obratovanje je pri kotih zakasnitve pri $\alpha = \pi/2$. Vse do $\alpha = \pi$ je obratovanje brezhibno. Zakasnitev vžiga pa ne sme preseči vrednosti večje od π , ker pri tej vrednosti doseže faza, katere ventil prevaja višjo vrednost od naslednje, zato le ta ne more ugasniti. Faza, ki še prevaja pri $\alpha = \pi$, mora prevajati še vso naslednjo polperiodo. Napetost med $U =$ in prevodno fazo doseže dvojno vrednost enosmerne napetosti. Ta pojav povzroči dvojni kratkostični tokovni udarec skozi ventil. Podobni tokovni udarec nastopi ob izpadu vžignega impulza ali ob kratkem izpadu napajalnega omrežja. Tokovni udarci povzročajo motnje v omrežju, hkrati pa lahko uničijo ventil.

ENOFAZNO ENOHODNO: Ker je U_p izmenična napetost, pošilja le izmenični tok v transformator. Obliko primarnega toka narekuje sekundarni tok, ki teče le v lihih polperiodah. Ker je sekundarni tok enosmeren, primarni pa izmeničen, pride do enosmerne predmagnetizacije v železnem jedru. Transformator je slabo izkoriščen, enosmerno predmagnetizacijo je treba pri projektiranju upoštevati. Če imamo **induktivno breme**, tok skozi breme le

počasi naraste in teče še dolgo potem, ko je napetost na transformatorju U_s spremenila smer. Vzrok je inducirana napetost na induktivnosti, ki je posledica časovne spremembe tokov. Induktivnost se uporablja za glajenje toka. **DVOFAZNO ENOHODNO:** Srednja vrednost usmerjene napetosti je 2x tolikšna kot pri enofaznem enohodnem vezju. V posameznem navitju transformatorja teče enosmerni tok vsako drugo polperiodo. Oblika primarnega toka je odvisna od oblike toka skozi sekundar in je, če upoštevamo prestavno razmerje transformatorja, vsota sekundarnih tokov. Če imamo **induktivno breme**, takšno, da je časovna konstanta mnogo večja od periode napajalne napetosti, se tok skozi breme med obratovanjem ne prekine. Usmerniški transformator za usmerniško napravo z induktivnim bremenom bo manjši za isto usmerjeno moč. **MOSTIČNO ENOHODNO:** zanj velja $p = 2 \cdot m_s$!! Zanj rabimo 4 ventile. Ker imamo induktivno breme z dušilko z veliko induktivnostjo, je enosmerni tok popolnoma zglajen. Primarni tok ima enako obliko kot pri dvofaznem enohodnem usm.

DVOPULZ. KRMILJENI USM: Ohmsko breme: ker ni reaktance, ima usmerjena napetost prav tak časovni potek kot enosmerni tok skozi breme. Vsak ventil zahteva svojo impulzno vžigno napravo ali vsaj galvansko ločene impulze ter sinhronizacijo na omrežno napetost. Srednja vrednost usmerjene napetosti ima funkcijsko odvisnost od kota zakasnitve vžiga. **Induktivno breme:** vsak ventil prevaja polovico periode, ne glede na to, kdaj je začel prevajati. Ventil prevaja še potem, ko je njegova faza postala negativna. Induktivnost prispeva svojo inducirano napetost, zaradi manjšanja toka. Velika induktivnost inducira napetost, ki kompenzira negativno fazno napetost in poganja enosmerni tok skozi ohmsko breme vse do trenutka, ko vžge naslednji ventil. Srednja vrednost usmerjene napetosti pada z naraščanjem kota zakasnitve vžiga. V prvem kvadrantu imamo opraviti z usmerniškim obratovanjem, v četrtem kvadrantu pa z razsmerniškim. Enosmerni tok obdrži tudi pri večjih α od $\pi/2$ isto smer, napetost pa smer spremeni. **TRIFAZNO ENOHODNO:** ohmsko breme: vsak ventil prevaja do $2\pi/3 = 120$. Ventil lahko vžgemo šele takrat, ko doseže predhodna faza, katere ventil še prevaja nižjo fazno napetost od naslednje faze. Ventil v fazi lahko začne prevajati šele potem, ko je ista faza prešla vrednost 0 V. Do $\alpha = \pi/6$ je časovni potek usmerjene napetosti za vsako zvrst obremenitve enak. Induktivno breme: Pri $\alpha = \pi/2$ zavzame usmerjena napetost pri induktivnem bremenu vrednost nič. Nad absciso imamo usmerniško obratovanje, pod absciso pa razsmerniško obratovanje. Do tokovnih udarcev pride pri 180 – ski zakasnitvi vžiga v področju razsmerjanja. **TRIFAZNI KRMILJENI USMERNIŠKI MOST:** posebnost je v zahtevi po vžignih impulzih. Ker v rednem obratovanju redno prevajata dve fazi, bi pri zagonu samo z vžigom ventila v eni fazi ne prišlo do usmerniškega oz. Razsmerniškega obratovanja. Poskrbeti moramo za hkratni vžig tudi tistega ventila, ki bi moral v sosednji fazi hkrati prevajati. Vsak ventil v trifaznem usm. Mostu z induktivnostjo prevaja $1/3$ periode ne glede na to, kolikšna je zakasnitev vžigov.

TRIF. ENOHODNO USMERNIŠKO VEZJE Z TR. Dy: ohmsko breme: enosmerni tok I ima enak časovni potek, kot enosmerna napetost. Za primer zelo velike gladilne dušilke ima v idealiziranem primeru tok skozi posamezni

ventil obliko pravokotnika, ker je enosmerni tok časovo konstanten. Usmerjena napetost je sestavljena iz treh pulzov in je neprekinjena. Prevajanje posameznega ventila traja $2\pi/3=120$ el. Sekundarni fazni tok usmerja elektriški ventil v isti fazi, zato je enosmeren. S sekundarnimi ovoji tvori tokovni pretok, ki je posledica enosmernega toka. Tako obstaja na posameznem stebru trofaznega usmerniš. Transformatorja enosmerna predmagnetizacija. Enosmerna predmagnetizacija v usmerniških transformatorjih enohodnih usmerniških vezji je nezaželen pojav, ki zahteva večji presek jedra. **TRIF. USMERNIŠKO VEZJE Z TR Yz:** s transf. Yz lahko enosmerno predmagnetizacijo v železnem jedru odpravimo. Sekundarno navitje posamezne faze je deljeno navito na dva sosednja stebra jedra. S tem dosežemo magnetiziranje železnega jedra v obeh smereh. Sekundarni magnetni pretok v posameznem stebru ima popolnoma izmenični značaj brez enosmerne komponente, zato enosmerne predmagnetizacije ni. **TRIFAZNA MOTIČNA VEZAVA:** vedno prevaja v pozitivni smeri ventil tiste faze, ki ima v tem trenutku največjo napetost, in v negativni smeri ventil faze, ki ima v tistem trenutku najbolj negativno napetost. Usmerjena napetost je sestavljena iz šestih pulzov, vsak ventil prevaja $2\pi/3$ periode, in vedno prevajata dva ventila hkrati, eden v poz. Drugi v neg. Periodi. Ker prevajata po dva ventila, ki imata vsak svoj padec napetosti, je zato usmerjena napetost manjša za dvojni napetostni padec na ventilu.

PRETVORNIKI S PRISILNO KOMUTACIJO: Osnovo pretvorniške tehnike s prisilno komutacijo predstavljajo enosm. in izmenične napetosti. Nastavljanje ali krmiljenje enosmerne napetosti Polprevodniško krmiljeno stikalo, ki obratuje v periodičnem stikalnem režimu, omogoča pretvarjanje z zvezno nastavljivo napetostjo. Poznamo več načinov krmiljenja: pulzno širinsko krmiljenje - $T_c \neq \text{konst. } T = \text{konst}$ (PWM), pulzno frekvenčno krmiljenje - $T_c = \text{konst. } T \neq \text{konst}$, dvopoložajna regulacija $T_c \neq \text{konst. } T \neq \text{konst}$. Najbolj naravna oblika izhodne napetosti RAZSMERNIKA je pravokotniška. Harmonska analiza pokaže veliko število prisotnih višje-harmonskih komponent reda n . V mnogih primerih pa potrebujemo čisto SINUSNO obliko napetosti, zato se poslužujemo ali filtrov ali pa krmiljenje izhodne napetosti razsmernika. Na voljo imamo pulzno širinsko krmiljenje ali pa pulzno frekvenčno krmiljenje. V glavnem uporabljamo PWM ter večkratni vklop in izklop napetosti v eni polperiodi. Tako dobimo mnogo boljši sinusni potek predvsem toka, manjša pa so tudi harmonska popačenja. **PRESMERNIKI Z PRISILNO KOMUTACIJO RAZSMERNIKI (DC-AC PRETVORNIKI):** izmenični elektromotorski pogoni, sistemi neprekinjenega napajanja - UPS. Ta vezja potrebujejo neko zunanje vezje, ki omogočajo prisilno komutacijo tiristorjev. Druga možnost je uporaba močnostnih krmilnih elementov, ki omogočajo krmiljenje izklopa - GTO tiristorji ali močnostni tranzistorji za stikalno obratovanje (BJT, MOS-FET, IGBT). Izbira krmilnih stikalnih elementov je pogojena z zahtevano močjo in stikalno frekvenco razsmernika. **ENOSMERNI PRESMERNIK NAVZDOL (buck converter):** na svojem izhodu lahko daje le nižjo srednjo vrednost napetosti, kot je priključena na vходу. Uporaben je povsod tam, kjer je potrebna enosm.

napetost na bremenu, ki je nižja od enosm. vhodne napajalne napetosti. Dioda v vezju je nujna zaradi induktivnosti, ki jo vsebuje nizko pasovni filter. Ko je stikalo sklenjeno (ventil v prevodnem stanju), se energija pretaka iz izvora proti bremenu, ko pa je stikalo izklopljeno, se breme napaja z energijo, ki je ostala shranjena v dušilki in kondenzatorju. V času prevajanja stikala je dioda zaporno polarizirana. S krmiljenjem močnostnega stikala spreminjamo prevajalno razmerje in vplivamo na vrednost izhodne napetosti enosmernega presmernika.

ENOFAZNI MOSTIČNI PRESMEERNIK: Osnova delovanja razsmernikov je dušilka. Vezje vsebuje poleg tiristorjev tudi prostotečne diode, ki v primeru induktivnih bremen omogočajo komutacijo tokov brez prenapetostnih obremenitev ventilov. Polprevodniška stikala krmilimo tako, da dobimo na izhodu razsmernika izmenično napetost s periodo 180° in sicer v paru prevajata ventila T1 in T2 oziroma T3 in T4. Ko sta vklopljena ventila T1 in T2, tok skozi njiju narašča po eksponentni krivulji. V trenutku ko izklopimo T1 in T2, se morata vklopiti T3 in T4, ki zamenjata polariteto napetosti na bremenu. **TRIFAZNI MOSTIČNI RAZSMERNIK:** Razsmernik je sestavljen iz šestih stikal, katerim so dodane še prostotečne diode. Polprevodniška stikala morajo omogočiti krmiljenje vklopa in izklopa toka skozi ventil. **RAZSMERNIKI S PULZNO ŠIRINSKO MODULACIJO IZHODNE NAPETOSTI:** Frekvenca preklapljanja polprevodniških močnostnih ventilov je pri zgoraj opisanem trifaznem mostičnem razsmerniku veliko pregraba, da bi imel bremenski tok sinusni potek. Pri razsmernikih velikih moči, je zato uporabljena pulzno širinska modulacija izhodne napetosti. Razsmernike ločimo glede na tip napajalnega vira. Razsmerniki z pulznoširinsko modulacijo pri svojem delovanju kombinirajo napetostno in frekvenčno krmiljenje. Pri PWM se prevajalno razmerje nenehno spreminja (običajno sinusno) kar povzroči približno sinusne poteke skozi breme. Z višanjem frekvence preklapov se povečuje kvaliteta sinusa na izhodu. Mejo pri stikalnih frekvencah omejujejo krmilni ventili. Tako razsmernik z tiristorjem deluje pri frekvenci od 500 do 2500Hz, ter nad 10kHz pri tranzistorskih razsmernikih.

RAZSMERNIKI V SODOBNIH ELEKTROMOTORNIKIH: V električnih sistemih sodobnih elektromotornikov nastopajo razsmerniki v dveh osnovnih funkcijah: 1. Napetostno frekvenčno krmiljenje vlečnih asinhronskih motorjev - razsmerniki velikih moči z visokonapetostnimi GTO tiristorji kot močnostnimi polprevodniškimi ventili ter s spremenljivo amplitudo in frekvenco izhodne napetosti. Sestavljen je iz treh faznih modulov, ki so kompaktne izvedbe. Vsak modul vsebuje dva visokonapetostna GTO tiristorja s pripadajočima prostotečnima diodama, vezjem in krmilno enoto za vklop in izklop tiristorja. 2. Napajanje pomožnih naprav na vlakih - razsmerniki srednjih moči (40 kVA) z IGBT tranzistorji kot močnostnimi polprevodniškimi ventili ter s konstantno izhodno napetostjo $3 \times 380 \text{ VAC}$ 50 Hz. **ENOSMERNI PRESMEERNIKI - DC-DC PRETVORNIKI:** V električnih sistemih sodobnih elektromotornikov uporabljamo enosmerne presmernike predvsem v dveh aplikacijah: 1. Pri nekaterih tipih vlakov napajalno napetost 3 kV DC najprej s pomočjo enosmernega presmemnika znižamo in jo šele nato

s pomočjo PWM razsmernika pretvorimo v izmenično, s katero napajamo vlečne asinhronske motorje. 2. Pri napajanju pomožnih naprav na vlakih enosmerno napetost 3 kV DC z enosmernim presmernikom znižamo na 650 V DC in to napetost za napajanje pomožnih izmeničnih porabnikov pretvorimo z razsmernikom na konstantno izmenično trifazno napetost 3×380 V AC. V principu pa DC-DC pretvornike oziroma enosmerne presmernike uporabljamo za napajanje enosmernih porabnikov, ki zahtevajo spremenljivo enosmerno napetost (predvsem pogoni enosmernih motorjev). Enosmerna napetost, ki je prisotna na vhodu takšnih pretvornikov, je pogosto neregulirana, ker jo dobimo z diodnim usmerjanjem in filtriranjem omrežne napetosti. Enosmerne presmernike delimo v štiri osnovne skupine glede na funkcijo, ki so jo sposobni izvesti: enosmerni presmernik navzdol (buck converter), enosmerni presmernik navzgor (boost converter), enosmerni presmernik navzdol/navzgor (buck/boost converter), Čuk enosmerni presmernik.

Konvekcionalni:

TIRISTOR: Je krmiljen polprevodniški ventil sestavljen iz 4 plasti p in n dopiranega silicija v izmeničnem zaporedju. Glede na strukture polprevodniških plasti jih delimo na 4 vrste, simetrični zaporni tiristor, asimetrični zaporni tiristor, reverzno prevodni tiristor, tiristor s krmiljenim izklopom. Pri preklopu tiristorja iz prevodnega v zaporno stanje v prevodni smeri pride do velikih prenapetosti zaradi kopicenja nosilcev elektrine, ki dosegajo pri prehodnih pojavih razred velikosti prebojnih napetosti v zaporni smeri tiristorja. Da se izognemo preboju tiristorja vezemo vzporedno k tiristorju diodo v nasprotni smeri (prostostecno diodo), ki v komutacijskem času sklene tokokrog preostalega naboja in prepriča prenapetosti. Tako varuje tiristor pred prebojem v reverzni smeri in zaradi reduciranja prenapetosti na vrednost padca napetosti diode v prevodni smeri neodvisno od velikosti toka zmanjša izgubno moc v času izklopa tiristorja. S protiparalelno diodo se poveča čas izklopa. **GTO TIRISTOR:** vklapljamemo ga s klasično pozitivnim tokovnim impulzom, in izklapljamemo ga z negativnim impulzom v tokokrogu vrata- katoda. Možnost prisilnega izklopa tiristorja pred točko naravne komutacije pomeni, da niso potrebna zahtevna draga in počasna komutacijska vezja za izklop klasičnega tiristorja. Ima tudi slabosti: slabše so karakteristike ob vklopu, potreben je močnejši prozilni impulz, večje so izgube med prevajanjem in vklopom, manjše so dopustne tokovne obremenitve. **TRIAK:** je združitev dveh tiristorjev vezanih protiparalelno v en sam element. Ima tri priključke in ga lahko prozimo v prevodno stanje v pozitivni in negativni polperiodi napajalne napetosti s pozitivnim oziroma negativnimi tokovnimi pulzi vrat (gate). Ima slabšo tokovno občutljivost vrat ter dalše izklopne case. Max napetosti in tokovi dosegajo vrednosti do 1000V

in 50A. **BJT TRANZ:** je tokovno krmiljen stikalni element in ima znatno visjo preklopno hitrost kot tiristorji, vendar ima karakteristični problem sekundarnega preboja. V prevodnem stanju je med kolektorjem in emitorjem nizek napetostni padec, zato so prevodne izgube bjt nizke. Da vzdržujemo prevodno stanje tranzistorja je potreben konstanten tok ustrezne vrednosti preko baze. Tokovno ojačanje je majhno, zato jih vezemo v Darlington vezavo. Moduli Bjt dosegajo vrednosti 1200V in 800A.

Moderni

IGBT TRANZ: lasnosti ki so podobne mosfetu; -napetostno krmiljena vrata z veliko notranjo upornostjo, - vhodna kapacitivnost ki se polni oziroma prazni pri vklopu oziroma izklopu elementa, - nevarnost poškodbe z elektrostaticnim nabojem. **Lasnosti bipolarnega tranzistorja:** - napetost nasicenja v prevodnem stanju praktično ni odvisna od kolektorskega toka, - upornost prevodne poti ni odvisna od temperature, - zelo majhne izgubne moci v prevodnem stanju, - ob izklopu se morajo manjšinski nosilci rekombinirati, kar povzroči zakasnitev, - nima notranje rezervne diode. Uporabljajo se pri frekvencah 15 do 20 KHz, kar je ugodno zaradi motenj v audifrekvenčnem pasu. Dosegajo preklopne karakteristike reda 1200V in 300A. **SIT TRANZ:** je visokofrekvenčni element za velike preklopne moci in je po načinu delovanja polprevodniška verzija vakumske triode. Tranzistor normalno kar prevaja, kar pomeni da pri napetosti med vrati in izvorom enaki nič, teče tok večinskih nosilcev od izvora proti ponoru in povzroča padec napetosti prevodne poti. Negativna napetost med vrati in izvorom preprečuje tok v smeri od ponora do izvora. Pri visokih negativnih napetosti vrati element povsem zapre. **TIRISTOR S STATIČNO INDUKCIJO – SITH:** je krmiljen preklopni element podoben gto-ju. Lasnosti podobne sit-u: normalno je element prevoden pri napetosti nič med vrati in katodo. – pri negativni napetosti med vrati in katodo (rezervna napetost pn spoja) začne element zapirati. – prevodnost se vzpostavi po zakasnilnem času in času narascanja toka od trenutka prehoda krmilne napetosti na nič. – napetostni padec prevodne poti je velik. Lasnosti sorodne GTO-ju: - vklop se izvrši pri zvisanju napetosti na vratih na vrednost nič, pri čemer steče v vrata kapacitivni tokovni impulz, ki povzroči preklon v prevodno stanje, napetost mora ostati nič za ohranitev prevodnega stanja. – Izklop se izvrši z negativnim pulzom, - dosega visje frekvence kot GTO. – ne zapira v rezervni smeri. **MCT TIRISTOR:** - velike preklopne moci, - majhni preklopni časi reda velikosti 1 Mikros.in visoke preklopne frekvence. –nizek padec napetosti v prevodni smeri. – napetostno krmiljenje vrati in zelo velika vhodna upornost, - veliko tokovno ojačanje pri vklopu in pri izklopu. – v rezervni smeri ima majhne vrednosti zapornih napetosti.

1 - VZP IN ZAP VEZAVA TIRISTORJEV, .STATIČNA KARAKT. TIRISTORJA, DINAMIČNA KARAKT

- 2,3 - ZMANJŠANJE JALOVE MOČI, TOKOVNI UDARCI
4 - ENOFAZNO ENOHODNO, DVOFAZNO ENOHODNO, MOSTIČNO ENOHODNO
5 - DVOPULZ. KRMILJENI USM, TRIFAZNO ENOHODNO, TRIFAZNI KRMILJENI USMERNIŠKI MOST
6 - TRIF. ENOHODNO USMERNIŠKO VEZJE Z TR Dy, TRIF. USMERNIŠKO VEZJE Z TR Yz, TRIFAZNA MOTIČNA VEZAVA
7 - PRETVORNIKI S PRISILNO KOMUTACIJO, PRESMERNIKI Z PRISILNO KOMUTACIJO RAZSMERNIKI (DC-AC PRETVORNIKI, ENOSMERNI PRESMERNIK NAVZDOL
8 - ENOFAZNI MOSTIČNI PRESMERNIK, TRIFAZNI MOSTIČNI RAZSMERNIK, RAZSMERNIKI S PWM,
9 - RAZSMERNIKI V SODOBNIH ELEKTROMOTORNIKI, ENOSMERNI PRESMERNIKI - DC-DC PRETVORNIKI
10 - *Konvekcionalni* , 11 - *Moderni*