

BRODSKI ELEKTRIČNI UREĐAJI

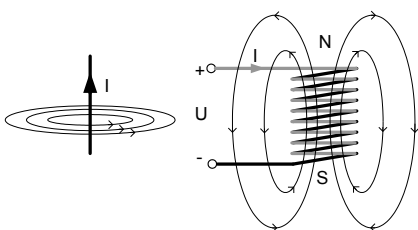
Dr. sc. Dubravko Vučetić

ver 5.2 (2012)

1.KOLOKVIJ

OSNOVE ELEKTROMAGNETIZMA

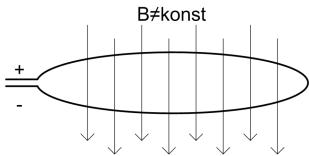
1. FORMIRANJE MAGNETSKOG POLJA U ELEKTRIČNIM STROJEVIMA



Oko vodiča kojim teče struja stvara se magnetsko polje. Smjer polja određuje se pravilom desnog vijka. Ako se vodič namota na kalem i kroz njega pusti struja, nastaje snažan elektromagnet. Kako silnice magnetskog polja neusporedivo lakše prolaze kroz željezo nego kroz zrak električni strojevi imaju magnetsku jezgru sačinjenu od čeličnih limova koji magnetsko polje stvoreno u uzбудnim namotima (elektromagnetima) sprovode do mjesta gdje će biti iskorišteno za stvaranje elektromagnetske sile ili induciranje napona u drugim vodičima.

$$H = \frac{NI}{l}$$

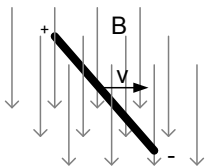
2. FARADAYEV ZAKON (POJAVA INDUCIRANOG NAPONA U VODIČU)



Ako se vodljiva petlja (namot) nalazi u promjenljivom magnetskom polju u njoj će se prema Faradayevom zakonu inducirati napon. Ako se strujni krug zatvori inducirani napon će potjerati struju koja stvara magnetsko polje koje se opire promjeni magnetskog toka koja je uzrokovala pojavu induciranog napona.

$$e = -N \frac{d\phi}{dt}$$

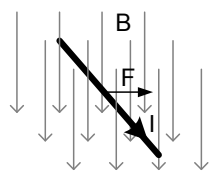
3. INDUCIRANJE NAPONA U ROTACIONIM STROJEVIMA



Na vodiču koji se kreće u magnetskom polju tako da siječe njegove silnice (ili obratno silnice se kreću i sijeku vodič) javlja se inducirani napon. Ako se strujni krug zatvori inducirani napon će potjerati struju koja stvara elektromagnetsku silu koja nastoji zaustaviti vodič.

$$e = Blv$$

4. ELEKTROMAGNETSKA SILA



Na vodič koji se nalazi u magnetskom polju ako kroz njega teče struja djeluje sila. Sila je okomita na smjer struje (vodič) i na smjer magnetskog polja, a kako je u biti riječ o vektorskom produktu njen se smjer određuje pravilom desne ruke: Ako se palac desne ruke usmjeri u smjeru struje, a kažiprst u smjeru magnetskog polja (indukcije) savinuti kažiprst pokazuje smjer sile.

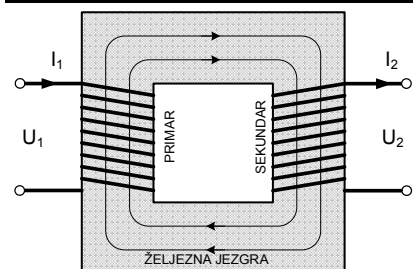
$$F = BIl$$

TRANSFORMATORI

5. BRODSKI TRANSFORMATORI

Transformatori su statički električni strojevi koji služe za pretvaranje **izmjeničnog** napona s jednog naponskog nivoa na drugi (npr. 440V/220V), pri čemu frekvencija ostaje nepromijenjena. Kako na izlazu (sekundaru) daju izmjeničnu električnu energiju snaga transformatora se izražava u kVA. Najčešći brodski transformatori su transformatori rasvjete koji transformiraju napon osnovne brodske mreže (440V 60Hz) na 220V (ili 110V) 60Hz potrebnih za rasvjetu i jednofazna trošila. Na brodovima s visokim naponom (3,3kV, 6,6kV ili 11kV) transformatori napajaju niskonaponski brodski sustav energijom dobivenom od glavnih generatora koji su u tom slučaju visokonaponski. Propulzijski transformatori imaju veliku snagu i napajaju propulzijske pretvarače. Pored nabrojanih velikih - energetske transformatora na brodu se još koriste i autotransformatori za upućivanje asinkronih motora, naponski i strujni mjerni transformatori, izolacijski transformatori i transformatori za zavarivanje. Brodski transformatori su vrlo pouzdani električni strojevi i obično ne zahtijevaju veliku pažnju.

6. PINCIP RADA TRANSFORMATORA

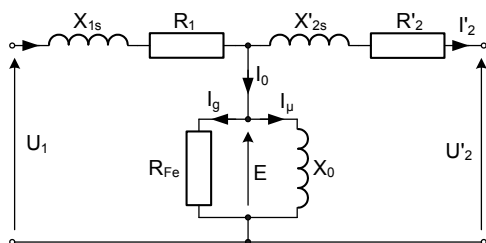


Aktivni dijelovi transformatora su magnetska (željezna) jezgra, primarni i sekundarni namot. Kada se primarni namot priključi na izvor izmjeničnog napona kroz njega poteče odgovarajuća izmjenična struja koja u magnetskoj jezgri stvori magnetsko polje. Sekundarni namot obuhvaća magnetsku jezgru kroz koju prolaze silnice promjenljivog magnetskog polja odnosno promjenljivi magnetski tok pa se u njemu inducira izmjenični napon. Ako se na krajeve sekundarnog namota priključi električno trošilo inducirani napon potjera struju koja stvara magnetsko polje što se opire promjeni magnetskog toka u jezgri. Snaga koju iz transformatora vuče električno trošilo priključeno na sekundar ($S_2 = U_2 I_2$) mora se na primarnoj strani uzeti iz izvora na koji je transformator priključen što znači da se s opterećenjem sekundara povećava ne samo njegova sekundarna već i primarna struja.

7. OSNOVNE JEDNADŽBE TRANSFORMATORA

Kod transformatora, kao i kod drugih električnih strojeva treba razlikovati inducirani napon E od napona koji se mjeri na njegovim stezaljkama U . Napon na stezaljkama sekundara U_2 odgovara induciranom naponu (elektromotornoj sili) u sekundarnom namotu E_2 , umanjenom za pad napona na unutarnjoj impedanciji (otporu) sekundarnog namota transformatora. Napon na stezaljkama primara U_1 je napon izvora i odgovara induciranom naponu (elektromotornoj sili) u primarnom namotu E_1 , uvećanom za pad napona na unutarnjoj impedanciji (otporu) transformatora. Omjer induciranih napona primara i sekundara jednak je omjeru broja zavoja. Omjer napona na stezaljkama primara i sekundara je zbog pada napona samo približno jednak omjeru broja zavoja i ovisi o veličini i karakteru (induktivno, kapacitivno ili djelatno) opterećenja (struje sekundara). Omjer struja primara i sekundara približno je obrnuto proporcionalan omjeru broja zavoja zbog struje magnetiziranja i gubitaka u željezu.

8. NADOMJESNA SHEMA TRANSFORMATORA



Nadomjesna shema olakšava razumijevanje rada transformatora i omogućuje jednostavnije izračunavanje njegovih gubitaka i padova napona. Zasniva se na redukciji transformatora na prijenosni omjer 1:1 uz preračunavanje svih sekundarnih veličina (struja, napona, otpora i induktiviteta) na primarnu stranu, koristeći stvarni prijenosni omjer (N_1/N_2). Na taj je način omogućeno direktno spajanje primarnog i sekundarnog kruga bez korištenja međuinuktiviteta. Ne smije se međutim zaboraviti da su u stvarnosti primarni i sekundarni namoti potpuno odvojeni i međusobno izolirani (osim kod autotransformatora).

$$U'_2 = \frac{N_1}{N_2} U_2$$

$$I'_2 = \frac{N_2}{N_1} I_2$$

$$R'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_2$$

$$X'_{2\sigma} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 X_{2\sigma}$$

U_1 - napon primara
 U'_2 - reducirani napon sekundara
 E - inducirani napon
 I_1 - struja primara
 I'_2 - reducirana struja sekundara

I_0 - struja praznog hoda
 I'_μ - struja magnetiziranja
 I_g - struja gubitaka u željezu
 R_1 - otpor primara
 R'_2 - reducirani otpor sekundara

$X_{1\sigma}$ - rasipna reaktancija primara
 $X'_{2\sigma}$ - reducirana rasipna reaktancija sek.
 R_{Fe} - otpor za izračun. gubitaka u željezu
 X_0 - glavna reaktancija transformatora

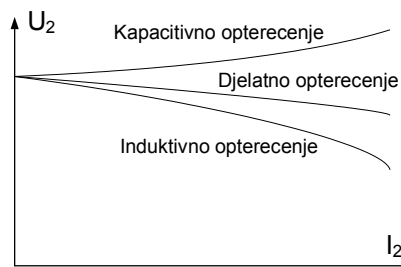
9. PRAZNI HOD TRANSFORMATORA

Transformator radi u praznom hodu ako mu je primarni namot priključen na napajanje, ali su sekundarne stezaljke otvorene odnosno nije priključeno nikakvo trošilo. Prema nadomjesnoj shemi, to znači da je $I'_2=0$ a $U'_2=E$. Transformator iz mreže uzima samo struju praznog hoda $I_1=I_0$ koja je zbog dominantne glavne reaktancije X_0 jako induktivna (vrlo nizak $\cos \varphi$). Djelatni dio snage se najvećim dijelom troši na gubitke u željezu ($P_{Fe}=E^2/R_{Fe}$), a samo malim, gotovo zanemarivim, na gubitke u bakru primara ($P_{Cu1}=I_1^2 R_1$). Za određivanje gubitaka u željezu transformatora provodi se pokus praznog hoda.

10. KRATKI SPOJ TRANSFORMATORA

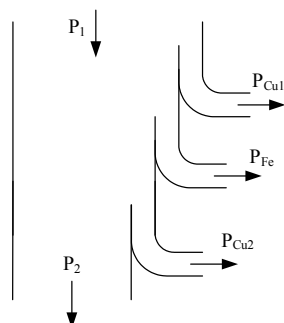
Ako tijekom rada transformatora, dakle dok mu je primarni namot priključen na napajanje, dođe do kratkog spoja na sekundarnim stezaljkama kroz transformator će poteći struja kratkog spoja I_k . Struja kratkog spoja je višestruko veća od nazivne struje jer je ukupna impedancija transformatora ($R_1+R'_2+jX_{1\sigma}+jX'_{2\sigma}$) vrlo mala i predstavlja veliku opasnost za transformator i mrežu te je zaštita mora brzo isključiti. Struja kratkog spoja $I_k=100I_n/u_{k\%}$ određena je veličinom napona kratkog spoja $u_{k\%}=100U_k/U_n$, gdje je U_n nazivni napon (primara) transformatora. Napon kratkog spoja U_k je napon koji priključen na primarne stezaljke transformatora iz kratko spojene sekundarne stezaljke potjera kroz transformator nazivnu struju a određuje se zajedno s ukupnim gubicima u bakru na upravo opisani način tzv. pokusom kratkog spoja.

11. PAD NAPONA NA TRANSFORMATORU



Kada se na sekundar transformatora priključi trošilo, prema nadomjesnoj shemi, kroz njega poteče struja I'_2 koja zbrojena sa strujom I_0 povećava struju primara I_1 . Obje struje stvaraju padove napona na otporima i reaktancijama transformatora pa se mijenja (uglavnom pada) i napon sekundara U_2 . Trošila se na sekundar spajaju paralelno čime se ukupni otpor potrošnje smanjuje a struja povećava. Pad sekundarnog napona međutim ne ovisi samo o veličini struje (snazi priključene potrošnje) već i o njenom karakteru. Kod iste sekundarne struje najveći je pad napona u slučaju opterećenja induktivnog karaktera (elektromotori, fluorescentna rasvjeta...), nešto manji kod djelatnog opterećenja (žarulje, grijači...) dok se kod kapacitivnog opterećenja (kondenzatori), koje se na brodu u pravilu ne može pojaviti, napon s opterećenjem čak i povećava.

12. BILANCA SNAGE I STUPANJ KORISNOSTI TRANSFORMATORA



Od snage privedene transformatoru P_1 dio se gubi na gubitke u bakru primara P_{Cu1} , dio na gubitke u bakru sekundara P_{Cu2} i dio na gubitke u željezu P_{Fe} . Stupanj korisnosti se kao i kod svakog drugog uređaja definira kao omjer korisne (izlazne) djelatne snage i privedene (ulazne) djelatne snage:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe} - P_{Cu2}}{P_1}$$

Stupanj korisnosti nije konstantan nego ovisi o veličini i vrsti opterećenja. Manji je kada transformator radi s opterećenjem koje ima nizak faktor snage ($\cos \varphi$)

13. GUBICI U BAKRU

Gubici u bakru nastaju prolaskom struje kroz bakrene namote električnih strojeva i predstavljaju Jouleovu toplinu. Kod transformatora se dijele na gubitke u namotu primara P_{Cu1} i gubitke u namotu sekundara P_{Cu2} . Gubici u bakru rastu s kvadratom struje (opterećenja). Gubici u bakru sekundara mogu se po istoj formuli izračunati i koristeći reducirane veličine R'_2 i I'_2 .

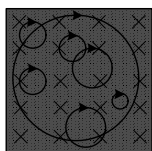
$$P_{Cu1} = (3)I_1^2 R_1 \quad P_{Cu2} = (3)I_2^2 R_2$$

(3) za trofazne transformatore.

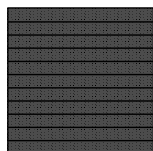
14. GUBICI ZBOG HISTEREZE

Gubici u željezu (magnetskoj jezgri) transformatora ne ovise o opterećenju i određuju se pokusom praznog hoda. Dije se na gubitke zbog histereze i gubitke zbog vrtložnih struja. Gubici zbog histereze nastaju zbog razlike u količini energije koju treba uložiti da bi se jezgra magnetizirala i količine energije koja se dobije nazad njenom demagnetizacijom. Razlika energije odnosno njen gubitak upravo je jednak površini unutar krivulje histereze materijala od kojeg je jezgra napravljena (najčešće su to dinamo limovi). Kod frekvencije od 60Hz jezgra u svakoj sekundi prođe 60 ciklusa koji odgovaraju krivulji histereze (magnetiziranje-demagnetizacija-magnetiziranje u suprotnom smjeru-demagnetizacija). Gubici zbog histereze rastu s povećanjem frekvencije i magnetske indukcije odnosno napona napajanja.

15. GUBICI ZBOG VRTLOŽNIH STRUJA



puna jezgra

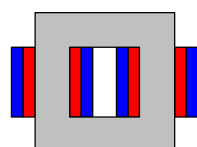


lamelirana izvedba

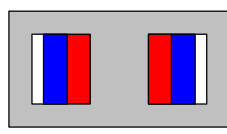
Gubici zbog vrtložnih struja nastaju zbog električne vodljivosti magnetske jezgre. Promatra li se poprečni presjek jezgre kao jedna vodljiva ploha (puna jezgra) može se zamisliti beskonačno mnogo kratko spojenih vodljivih petlji koje obuhvaćaju promjenljivi magnetski tok što prolazi jezgrom transformatora. U svakoj od njih se prema tome inducira napon koji, budući da su zatvorene, potjera struju. Takve se struje zbog svojeg oblika nazivaju vrtložnim strujama. Prolaskom kroz jezgru vrtložne struje stvaraju gubitke i zagrijavaju je. Gubici zbog vrtložnih struja se smanjuju tako da se jezgra radi u lameliranoj izvedbi od tzv. dinamo-limova koji su međusobno električki izolirani i sprječavaju nastajanje petlji koje bi obuhvaćale velike površine i prema tome imale veliki inducirani napon a onda i vrtložnu struju. Što su tanji limovi gubici zbog vrtložnih struja su manji. Gubici zbog vrtložnih struja ovise o magnetskoj indukciji (naponu) i frekvenciji, a ne ovise o opterećenju (struji) transformatora.

16. IZVEDBE JEZGRE JEDNOFAZNIH I TROFAZNIH TRANSFORMATORA

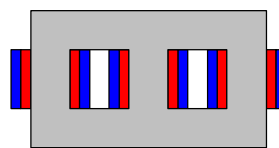
Razlikujemo dvije izvedbe magnetskih jezgri transformatora: jezgrasti tip (core type) i ogrnuti tip (shell type). Uglavnom se koristi jezgrasti tip. Transformatori s ogrnutim tipom jezgre su zbog grananja magnetskog toka nešto niži što može biti interesantno zbog prijevoza i smještaja. Na jezgru obloženu pojačanom izolacijom se najprije namataju primarni namoti preko kojih se stavi izolacija pa se na nju namotaju sekundarni namoti. Jedino se kod visokonaponskih transformatora koriste podijeljeni (naizmjenično motani) namoti.



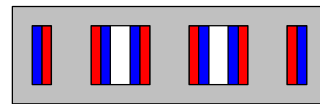
jezgrasti tip



ogrnuti tip



jezgrasti tip



ogrnuti tip

17. HLADENJE TRANSFORMATORA

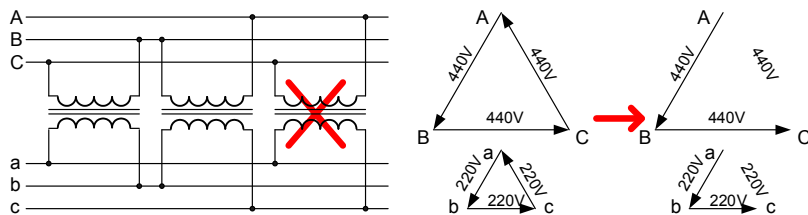
Kada je transformator u rada, gubici u željezu, neovisno o opterećenju, zagrijavaju dinamo limove odnosno jezgru transformatora. S druge strane gubici u bakru, koji su proporcionalni kvadratu struje (opterećenja), zagrijavaju primarne i sekundarne namote. Kako ne bi došlo do pregrijavanja navedenu toplinu treba neprestano odvoditi. Način odvođenja topline ujedno određuje i vrstu transformatora pa razlikujemo: uljne transformatore kod kojih se jezgra i namoti hlade uljem i suhe transformatore kod kojih se hlade zrakom. Iako Registar dozvoljava ugradnju uljnih transformatora (istina - samo u prostoru strojarnice) na brodovima se uglavnom koriste suhi transformatori jer uljni imaju niz nedostataka: Najznačajniji je **opasnost od eksplozije i požara** u slučaju kratkog spoja. Minearalna transformatorska ulja su higroskopska (vežu se s vlagom) pa zahtijevaju periodičku kontrolu i zamjenu. Sintetska ulja nisu zapaljiva ali su kancerogena i prilikom odlaganja moraju se tretirati kao opasne tvari. **Održavanje** je dakle kod uljnih transformatora složenije i skuplje. Suhi transformatori su k tome još i **lakši**. Manji brodski energetske transformatori (transformator rasvjete) su potpuno zatvorene izvedbe (smješteni su u zatvoreno kućište) kako bi se spriječilo, mehanička oštećenja, taloženje prašine i izloženost vlazi koja bi ugrozila kvalitetu izolacije. Kućište se izvanz obično hladi prirodnom cirkulacijom zraka. Veliki propulzijski transformatori se hlade pomoću snažnih ventilatora prisilnom cirkulacijom zraka koji se prethodno ohladi na izmjenjivaču topline hladnom vodom. Do pregrijavanja transformatora općenito može doći zbog: preopterećenja, slabog hlađenja ili previsoke temperature okoline. Treba voditi računa da je prostorija u kojoj se nalaze transformatori dobro ventilirana i da su transformatori čisti - bez debelih naslaga prljavštine i boje.

18. 3-F TRANSFORMATORI

Primarni i sekundarni namoti trofaznih transformatora mogu se spajati u zvijezdu, trokut i cik-cak, kao i kombinacije navedenih spojeva. Spoj transformatora označava se jednim velikim i jednim malim slovom uz dodatak tzv. satnog broja. Prvo (veliko) slovo označava spoj primarnih namota, a drugo (malo) slovo spoj sekundarnih namota. (D trokut, Y zvijezda, Z cik-cak). Satni broj transformatora ovisi o odabranom spoju. a pokazuje koliki je fazni pomak između faze vrijednosti sekundarnog i primarnog napona pojedine faze. Ako se satni broj pomnoži s 30 dobije se fazni pomak u stupnjevima. Primjer: Oznaka Dy5 znači da je primarni namot spojen u trokut, sekundarni u zvijezdu i da je kut između primarnog i odgovarajućeg sekundarnog napona $5 \times 30^\circ = 150^\circ$.

19. TRANSFORMATORI ZA RASVJETU

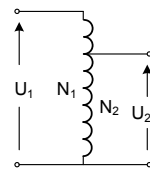
Na brodovima se za sniženje napona na 220V ili 110V potrebnih za napajanje rasvjete koriste dva rješenja: 1) dva trofazna transformatora od kojih jedan pokriva svu potrošnju a drugi je hladna rezerva za slučaj da se prvi pokvari i 2) tri jednofazna transformatora koji su svi priključeni iako su i samo dva po snazi dovoljna da pokriju svu potrošnju. Ovi jednofazni transformatori su električki spojeni u spoj Dd (trokut-trokut) i prema tome osiguravaju linijski napon između svih parova faza (svaki za jedan par faza). Vektori primarnih i sekundarnih napona pomaknuti su za 120° i tvore trokute. Ako se jedan od jednofaznih transformatora isključi zbog kvara, na



mreži rasvjete će, zbog faznog pomaka između sekundarnih napona preostala dva transformatora, i dalje egzistirati tri pravilno vremenski pomaknute faze s nazivnim linijskim naponima. Takav režim rada se naziva otvoreni trokut. Inačica s jednofaznim transformatorima je povoljnija jer u slučaju kvara na jednom od transformatora nema prekida u napajanju mreže rasvjete, obzirom da ga zaštite brzo isključe a preostala dva transformatora daju energiju za sve tri faze. Trofazni transformator bi se se također mogao spojiti u spoj Dd (trokut-trokut) a naponski bi odnosi u tom slučaju bili isti kao i kod tri jednofazna transformatora. Ako bi se isključila jedna faza trofaznog transformatora on bi nastavio snabdijevati svu potrošnju na sekundaru bas kao i dva jednofazna u otvorenom trokutu. Problem je u tome što su kod trofaznog transformatora sve tri faze povezane i magnetskom jezgrom pa svaka faza obuhvaća i magnetske tokove preostale dvije. Dakle, slučaju kratkog spoja na namotima jedne faze ne pomaže njeno isključivanje s mreže jer preostale dvije faze daju njenim namotima puni magnetski tok koji napaja kratki spoj. Zbog toga su i struje zdravih faza izuzetno velike (kratki spoj) pa zaštita trenutno isključuje cijeli transformator.

20. AUTOTRANSFORMATOR

Autotransformator ili transformator u štednom spoju, ima električki povezane primarne i sekundarne namote tako da se dio energije prenosi na sekundar direktno putem struje koja teče sa primara na sekundar, dok se kod klasičnog dvonamotnog transformatora sva energije prenosi preko magnetske jezgre u obliku energije magnetskog polja. Presjek jezgre je naravno proporcionalan količini energije koja se njome prenosi, pa je u slučaju autotransformatora presjek jezgre manji a time i masa ugrađenih dinamo-limova. Manji presjek jezgre ima i manji opseg pa je duljina svakog zavoja namota manja, što u konačnici daje mnogo manje utrošenog bakra i mnogo jeftiniji transformator. Zbog manje mase željezne jezgre manji su i gubici u željezu, a zbog kraćih namota manji je i njihov otpor, pa su manji i gubici u bakru bas kao i napon kratkog spoja. Stupanj korisnosti autotransformatora je dakle veći a veća je i struja kratkog spoja. Zbog manjeg otpora manji su i padovi napona kod opterećenja. Zbog svega se toga autotransformatori mnogo koriste na visokonaponskim kopnenim sustavima, ali je istovremeno njihova upotreba na brodovima zabranjena osim kada je riječ o upućivanju asinkronih kaveznih motora. Autotransformatori se također ne smiju koristiti kod velikih prijenosnih omjera (razlika između primarnog i sekundarnog napona veća od 3 puta), a pogotovo ne za sniženje napona na sigurnosni napon ($<50V$). Kod autotransformatora naime nema galvanskog odvajanja (izolacije) između primara i sekundara jer su oni električki povezani, pa postoji opasnost da se zbog prekida u kabeu ili namotu transformatora na sekundaru pojavi potencijal (napon prema masi) primarne faze. Tipiska snaga autotransformatora S_T je snaga koju bi imao obični dvonamotni transformator istih dimenzija kao autotransformator za koji je definirana. Tipiska snaga zorno pokazuje veličinu uštede primjenom autotransformatora. Ušteda je to veća što je prijenosni omjer manji odnosno N_2/N_1 veće.



$$S_T = S_n \left(1 - \frac{N_2}{N_1} \right)$$

21. NAPONSKI MJERNI TRANSFORMATORI

Naponski mjerni transformatori se na sustavima niskog napona u pravilu ne koriste osim kada se instrumenti smještaju u komandne pultove u kojima se ne želi imati napon opasan po život odnosno kada se podatak o naponu treba dovesti uređajima automatskog upravljanja ili nadzornom sustavu koji rade sa sasvim malim naponima. S druge strane kada na brodu postoji visoki napon onda je korištenje naponskih mjernih transformatora obavezno kako bi se smanjio rizik od spoja s masom i opasnost pri rukovanju električnom opremom.

22. STRUJNI MJERNI TRANSFORMATORI

Strujni mjerni transformatori se na visokonaponskim sustavima koriste iz istih sigurnosnih razloga kao i naponski mjerni transformatori, dakle da se instrument električki odvoji od visokog napona. Strujni mjerni transformatori se međutim mnogo koriste i na niskonaponskim sustavima. Kod mjerenja vrlo velikih struja nije moguće koristiti instrument za direktno mjerenje jer bi mjerni shunt morao biti izuzetno velik i na njemu bi se stvarali veliki gubici. Pored toga nemoguće je priključiti debele kabele na mali instrument. Strujni mjerni transformatori vrlo precizno transformiraju primarnu struju na sekundarnu koja je kod punog opterećenja obično jednaka 5A. Na sekundar se tankim žicama priključuje ampermetar, a u seriju s njim, po potrebi, i svi drugi instrumenti koji trebaju podatak o struji (mjerenje snage, $\cos\phi$, A/D pretvarači...). Na brodu se koriste za mjerenje struja generatora u generatorskim poljima glavne rasklopne ploče, ali i za mjerenje struja svih većih elektromotornih pogona i odvoda prema razdjelnicima snage. Ugrađuju se već i za struje od 20A.

Strujni mjerni transformator je konstruiran da radi u kratkom spoju s najmanjom mogućom pogreškom pri transformaciji. Njegova primarna struja nije kao kod običnog transformatora, koji se na mrežu spaja paralelno, određena impedancijom sekundarne potrošnje već je to mjerena veličina (npr. struja generatora) na koju strujni mjerni transformator nema nikakvog utjecaja. Strujni mjerni transformator se spaja dakle u seriju s uređajem kojem se mjeri struja. Dok je strujni mjerni transformator u kratkom spoju (na sekundar mu je priključen ampermetar) primarna se struja, prema nadomjesnoj shemi, najvećim dijelom zatvara kroz sekundar, dok samo njen manji dio prolazi centralnom granom i predstavlja struju praznog hoda (struja magnetiziranja i struja gubitaka u željezu)

koja mora biti vrlo mala jer o njoj ovisi točnost mjerenja (greška). Ako se sekundar otvori (prekine se kratki spoj) cjelokupna primarna struja, na koju transformator nema utjecaja, postaje struja magnetiziranja jer se više ne može zatvoriti kroz sekundar. Jezgra se premagnetizira i odlazi duboko u zasićenje pa se javljaju izuzetno veliki gubici u željezu koji pregrijavaju jezgru transformatora. Zbog toga stradava izolacija između dinamo-limova pa se još više povećavaju gubici zbog vrtložnih struja. Iako nisu preopterećeni primarni i sekundarni namoti se pregrijavaju zbog blizine usijane jezgre te može ponekad pregorjeti i njihova izolacija. Ako se to i ne dogodi, transformator je nepovratno uništen jer zbog povećanih gubitaka zbog vrtložnih struja uslijed gubitka dijela izolacije između limova više neće dovoljno točno transformirati struju. Prikazana struja je manja od stvarne, jer preveliki dio primarne (mjerene) struje odlazi za pokrivanje gubitaka u željezu, i može dovesti do pogrešnih zaključaka o npr. nedovoljnoj snazi koju daje dizel-generator odnosno pomoćni motor.

23. PARALELNI RAD TRANSFORMATORA

Paralelni rad transformatora nastupa kad se dva ili više transformatora paralelno spoje na primarnoj i sekundarnoj strani. Trajni paralelni rad transformatora prakticira se na kopnenim sustavima kako bi se povećala raspoloživost električne energije (ako se jedan transformator pokvari ostali osiguravaju snabdijevanje) ali i smanjili gubici uključivanjem onolikog broja transformatora koliko je prema trenutačnoj potrošnji potrebno. Na brodu je paralelni rad nepotreban jer u pravilu uvijek postoje dva transformatora od kojih svaki potpuno zadovoljava potrebe potrošnje, a drugi je rezerva. Paralelni rad koristi se samo kratkotrajno pri besprekidnoj zamjeni transformatora na mreži ili pri povezivanju razdvojenih visokonaponskih sabirnica. Trajni paralelni rad se izbjegava jer u stvarnosti transformatori nikad nisu identični pa se uvijek javlja i struja izjednačenja koja stvara nepotrebne gubitke, ali još važnije: eventualni kratki spoj na sekundarnoj strani tijekom paralelnog rada razvio bi dvostruko veću struju nego kada je u radu samo jedan transformator. Da bi se mogli priključiti u paralelni rad transformatori moraju imati isti prijenosni omjer, isti napon kratkog spoja i isti satni broj, a moraju se naravno spojiti tako da im je isti i redoslijed faza.

24. TRANSFORMATOR ZA ZAVARIVANJE

Iako se danas zbog male težine i praktičnosti uglavnom koriste aparati za zavarivanje s tzv. inverterom koji spadaju u uređaje energetske elektronike ipak se i dalje susreću klasični transformatori za zavarivanje. Transformator za zavarivanje je napravljen tako da u praznom hodu daje dovoljno visoki napon za paljenje luka (cca 70V), a da njegovom uspostavom napon jako padne kako struja zavarivanje ne bi bila prevelika. Zato transformator za zavarivanje ima veliku impedanciju odnosno napon kratkog spoja. Kako električni luk ima vrlo mali napon transformator za zavarivanje praktički mora raditi u kratkom spoju pa mu je napon kratkog spoja otprilike 90% od nazivnog napona. Pored toga transformator za zavarivanje mora imati i mogućnost regulacije struje zavarivanja što se postiže na dva načina: 1) kontinuirano –promjenom rasipnog magnetskog toka pomoću pomičnog dijela željezne jezgre koji se zakreće pužnim prijenosom, 2) skokovito -preklapanjem odcjepa na primarnim i/ili sekundarnim namotima. Današnji aparati za zavarivanje mogu dati i istosmjernu struju jer imaju ugrađen diodni ispravljački most koji ispravlja sekundarni napon.

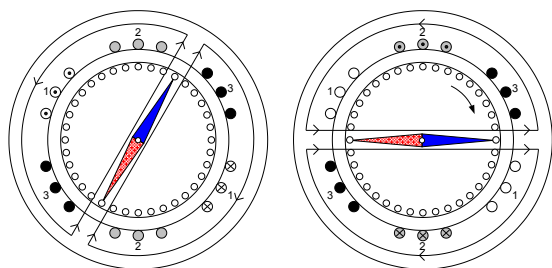
25. KVAROVI TRANSFORMATORA

Kao i svi drugi električni uređaji i na transformatorima se mogu pojaviti tri osnovne vrste kvara: spoj s masom, kratki spoj i prekid strujnog kruga. U slučaju spoja s masom javlja se na brodu alarm niskog otpora izolacije u sustavu isto kao i kod spoja s masom bilo kojeg drugog uređaja. Otpor izolacije se u isključenom stanju (moraju se isključiti i primar i sekundar) ispituje megaommetrom (megeom): primarni namoti prema masi, sekundarni namoti prema masi i primarni namoti prema sekundarnim namotima. Najmanji dozvoljeni otpor je $1\text{k}\Omega/\text{V}$, dakle $440\text{k}\Omega$ za napon od 440V. Ukoliko je otpor niži može se pokušati sa sušenjem transformatora. Ako sušenje ne daje rezultata, a nema vidljivih spojeva s masom priključcima, transformator mora u servis na prematanje. Kratki spoj se manifestira pregaranjem osigurača odmah po uključanju transformatora na mrežu. U tom slučaju nakon provjere otpora izolacije treba izmjeriti otpor namota u hladnom stanju i usporediti ga s podacima s ispitnog lista. Ako je otpor znatno manji znači da je došlo do kratkog spoja i transformator mora u servis na prematanje. Posebna vrsta kvara je kratki spoj među susjednim zavojima transformatora. U tom se slučaju transformator pregrijava a prijenosni omjer mu je na toj fazi promijenjen na više ili na niže zavisno od toga da li je spoj na primarnom ili na sekundarnom namotu. U slučaju prekida, na sekundarnom namotu transformatora jednostavno nema napona. Kod trofaznog transformatora ili spoja tri jednofazna transformatora transformator u prekidu može raditi normalno ali je izgubio jednu trećinu snage pa su struje na drugim fazama povećane.

ASINKRONI MOTORI

26. PRINCIP RADA ASINKRONOG MOTORA.

Princip rada asinkronog motora zasniva se na okretnom magnetskom polju. Uvjet za dobivanje okretnog magnetskog polje je da postoje barem dva prostorno pomaknuta namota kroz koje teku vremenski (fazno) pomaknute struje. Trofazni asinkroni motor ima tri



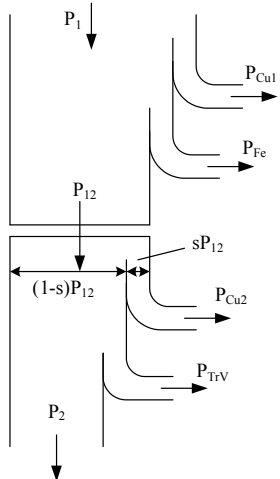
prostorno pomaknuta namota (faze) koji se priključuju na trofazni sustav napona koji potjera tri fazno pomaknute struje. Uzmimo na primjer trenutak u kojem je faza 1 najjača i trenutak kada je najjača faza 2. Između ta dva trenutka se vektor okretnog magnetskog polja (prezentiran na slici kazaljkom kompasa koja nije dio motora) pomaknuo za 30° što znači da se polje okreće. U stvarnosti u svakom trenutku sva tri namotaja zajednički stvaraju magnetsko polje koje je uvijek istog intenziteta ali neprestano mijenja smjer pa ga nazivamo okretnim magnetskim poljem. Okretno magnetsko polje se vrti sinkronom brzinom koja je proporcionalna frekvenciji (f) a obrnuto proporcionalna broju pari polova (p) statorskog namota. Kod uključivanja motora na napon rotor stoji. Silnice okretnog magnetskog

$$n_s = \frac{60f}{p}$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

polja presijecaju vodiče rotora u kojima se zbog toga inducira napon, koji kroz njih obzirom da su kratko spojeni (kavezni rotor) potjera struju. Kako na vodiče (rotora) kroz koje teče struja a nalaze se u magnetskom polju (statora) djeluje sila, javlja se moment koji počinje ubrzavati rotor. Asinkroni motor se ne može okretati sinkronom brzinom jer bi se kod sinkrone brzine rotorski vodiči i silnice okretnog magnetskog polja okretali istom brzinom odnosno jedno naspram drugoga mirovali. Drugim riječima ne bi bilo presijecanja vodiča rotora od strane silnica okretnog magnetskog polja statora, pa ni induciranog napona, kao ni struje na rotoru, a prema tome ni elektromagnetske sile. Relativna razlika između brzine rotora i brzine okretnog magnetskog polja (sinkrone brzine) izraženo u postotku potonje naziva se klizanje (s). Klizanje dakle pokazuje relativno zaostajanje rotora za statorskim okretnim magnetskim poljem. Kod nazivnog opterećenja iznosi 3-5%. Što je motor opterećeniji radi s većim klizanjem. Klizanje u praznom hodu (kad na osovini motora nema priključenog mehaničkog tereta) je vrlo malo. Što su motori veći (snažniji) to je nazivno klizanje manje. Smjer vrtnje asinkronog motora se može promijeniti tako da se pri priključku statorskih namota zamijeni redoslijed faza (u priključnoj kutiji zamijene se bilo koja dva vodiča priključnog kabela ne računajući naravno uzemljenje). Rotor asinkronog motora koji može biti kavezni ili kolutni. Namot kaveznog motora je najčešće izliven direktno u utore rotorskog paketa dinamo-limova i ima oblik vodeničkog kola (niz štapova povezanih na krajevima s dva kratkospojna prstena). Namot kolutnog rotora je klasičnog tipa s izolacijom, spojen u zvijezdu čiji slobodni krajevi završavaju na kliznim kolutima.

27. BILANCA SNAGE I STUPANJ KORISNOSTI ASINKRONOG MOTORA

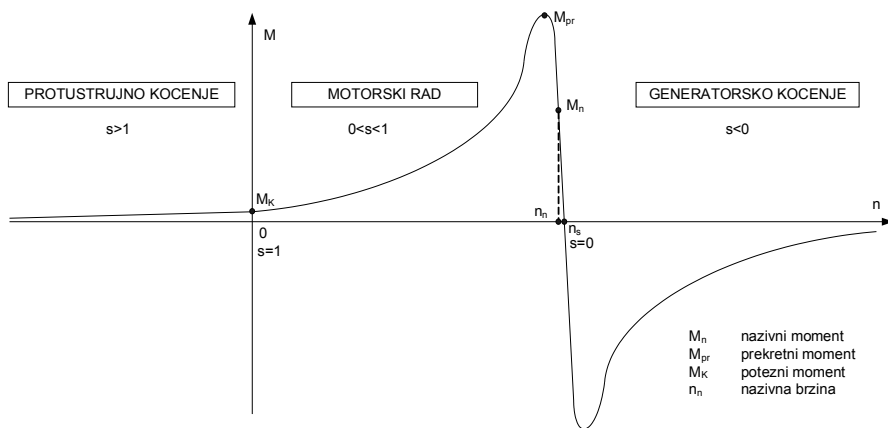


Bilanca snage pokazuje gubitke u stroju. Najprije se odbijaju gubici u bakru statora P_{Cu1} . Slijede gubici u željezu primara i statora P_{Fe} koji se odbijaju na statorskoj strani jer statorski namoti magnetiziraju željezo statora i rotora. Preostala snaga je snaga u zračnom rasporu P_{12} koja se prebacuje na rotor. Na rotoru nastaju gubici u bakru rotora P_{Cu2} koji su, što je izuzetno važno, proporcionalni klizanju s i snazi u zračnom rasporu P_{12} . To znači da se s povećanjem klizanja (smanjenjem brzine) jeko povećavaju gubici. Kod svakog pokretanja (zaleta) asinkroni motor kreće u kratkom spoju jer je kod zaustavljenog rotora klizanje $s=1$, pa sva energija dovedena motoru iz mreže odlazi u gubitke, odnosno zagrijavanje motora. To je izuzetno veliki termički šok za motor koji se zatim ohladi u radu. Uzastopni zaleti dozvoljeni su samo na motorima koji su predviđeni za takav (intermitirani) režim rada, a nikako na motorima predviđenim za trajni režim rada (S1). Na kraju treba još spomenuti mehaničke gubitke trenja i ventilacije P_{TrV} , koji se odbijaju od mehaničke snage predane rotoru $P_{meh}=(1-s)P_{12}$. Stupanj korisnosti se kao i kod svakog drugog uređaja definira kao omjer korisne (izlazne – mehaničke) snage i privedene (ulazne – električne) snage. Nazivna snaga motora je mehanička snaga na osovini P_2 i izražava se u kW.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe} - P_{Cu2} - P_{TrV}}{P_1}$$

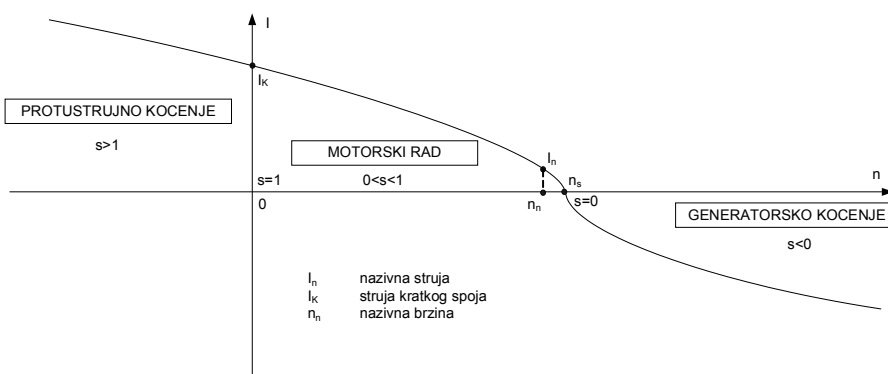
28. MOMENTNA KARAKTERISTIKA ASINKRONOG STROJA

Momentnu karakteristiku asinkronog motora karakterizira vrlo mali potezni moment M_k , zbog čega se standardne izvedbe kaveznih motora ne mogu koristiti za pokretanje potencijalnog tereta (dizalice) već samo centrifugalnog (pumpe i ventilatori) ili mehanizama koji startaju rasteraćeni (kompresori). Nakon zaleta pri kojem se na trenutak postigne maksimalni moment koji se naziva prekretnim (M_{pr}), motor radi u području između nazivnog momenta M_n i sinkrone brzine ($M=0$). Ako je moment tereta prevelik brzina padne ispod nazivne a motor se pregrijava. Zavrtno li motor vanjskim momentom preko sinkrone brzine moment postane negativan a motor prelazi u generatorsko kočenje i vraća energiju u mrežu. Zamjenom dviju faza dok se motor još vrti započinje protustrujno kočenje koje razvija relativno mali kočni moment uz opasnoo pregrijavanje motora.

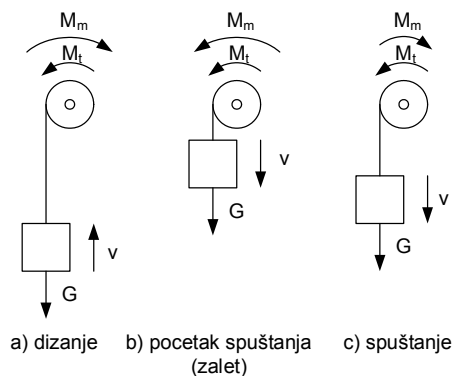


29. KARAKTERISTIKA STRUJE ASINKRONOG STROJA

Karakteristiku struje asinkronog motora karakterizira izuzetno velika struja pokretanja koja se naziva strujom kratkog spoja a kod standardnih izvedbi kaveznih motora je 5 do 7 puta veća od nazivne struje. Kako bi se smanjio udarac struje na brodski elektroenergetski sustav, koji bi za posljedicu imao propad napona i frekvencije, veliki se asinkroni kavezni motori startaju pomoću indirektnih uputnika. U protustrujnom kočenju je struja još veća i jako opasna za motor. Kada se asinkroni stroj koji je priključen na mrežu vrti brzinom većom od sinkrone, struja mu je negativna što znači da je u generatorskom radu i da vraća energiju nazad u mrežu.



30. GENERATORSKO KOČENJE ASINKRONOG MOTORA NA PRIMJERU BRODSKOG TERETNOG VITLA (DIZALICE)

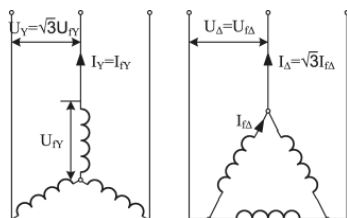


Na početku dizanja tereta (a), moment motora nadjačava moment tereta i teret se ubrzava do stacionarne brzine kod koje se moment motora izjednači s momentom tereta. Nakon što je postignuta zahtijevana visina motor se isključi s mreže, a mehanička kočnica blokira motor i teret. Uključi se sklopnik za spuštanje kod kojega su dvije faze zamijenjene u odnosu na sklopnik za podizanje. Započinje zalet motora i tereta prema dolje pri čemu oba momenta (motora i tereta) djeluju u istom smjeru (b). Kada motor prijeđe sinkronu brzinu prelazi u generatorsko kočenje i počinje negativnim momentom kočiti teret. Kada se momenti tereta i motora (u generatorskom kočenju) izjednače teret se nastavi spuštati jednolikom brzinom (c).

31. PROTUSTRUJNO KOČENJE ASINKRONOG MOTORA NA PRIMJERU VENTILATORA STROJARNICE

Ventilatori strojarnice imaju mogućnost promjene smjera vrtnje. Da bi se promijenio smjer vrtnje potrebno je najprije motor isključiti s mreže, pričekati da se zaustavi i zatim uključiti s promijenjenim redoslijedom faza (sklopnik za suprotni smjer vrtnje). Ako se suprotni smjer vrtnje uključi prije nego što se motor zaustavio tada se rotor vrti na jednu stranu a novostvoreno okretno magnetsko polje na drugu, što znači da je brzina rotora negativna, klizanje veće od 1 i da se motor nalazi u protustrujnom kočenju. Nakon što se zaustavi motor odmah kreće u zalet u suprotnom smjeru. U protustrujnom kočenju su gubici u motoru jako veliki pa se lako može dogoditi da tijekom kočenja ili ponovnog zaleta proradi bimetalna zaštita i isključi motor.

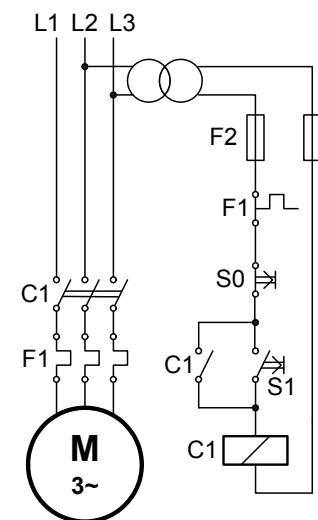
32. UPUĆIVANJE KAVEZNIH ASINKRONIH MOTORA



Asinkroni kavezni motori se u kopnenim postrojenjima u pravilu uključuju direktnim uputnikom i pri tome povuku iz mreže 5-7 puta veću struju od nazivne. Kako je brodska električna centrala, za razliku od kopnene mreže, relativno slaba u odnosu na snagu velikih brodskih elektromotornih pogona, veći se motori na brodu ne mogu startati **direktno** jer bi na brodskoj mreži došlo do prevelikog propada napona i frekvencije. Stoga se koristi nekoliko metoda za smanjenje struje: uputnik **zvijezda – trokut**, uputnik s **autotransformatorom**, uputnik s **prigušnicom** i **tiristorski** uputnik (soft starter). Višebrzinski asinkroni kavezni motori palubnih strojeva uvijek se uključuju u najnižoj brzini jer je tada udarac struje najmanji. Od indirektnih uputnika najviše se koristi uputnik

zvijezda trokut koji zahtijeva najmanje ulaganje. Uputnici s prigušnicom su vrlo rijetki, dok uputnici s autotransformatorom zahtijevaju ulaganje u kupnju autotransformatora ali zato mogu startati motor u više stupnjeva i tako smanjiti udarac struje. Najmanji udarac struje imaju najskuplji - tiristorski uputnici, koji također daju motoru smanjeni napon koji kontinuirano podešavaju u svrhu starta s konstantnom strujom..

33. UPUĆIVANJE ASINKRONOG MOTORA POMOĆU DIREKTNOG UPUTNIKA



Direktni uputnik se koristi za uključivanje manjih kaveznih elektromotora na brodu. Sastoji se od jednog sklopnika, dva tipkala i bimetalne zaštite. Neki uputnici imaju i jednofazni transformator kojim se napaja upravljački dio uputnika. U relejnim shemama se svi kontakti crtaju u položaju koji zauzimaju kada uređaj još uopće nije bio u funkciji (tek proizveden, nije pod naponom). Razlikujemo mirne kontakte koji su normalno zatvoreni a otvaraju se kada kroz špulu sklopnika ili releja poteče struja, i radne kontakte koji su normalno otvoreni a zatvaraju se kad kroz špulu poteče struja. Kod sklopnika i prekidača razlikujemo glavne kontakte kroz koje teku velike struje i pomoćne kontakte kroz koje teku manje struje (max 5A) a služe za upravljačke i signalne krugove.

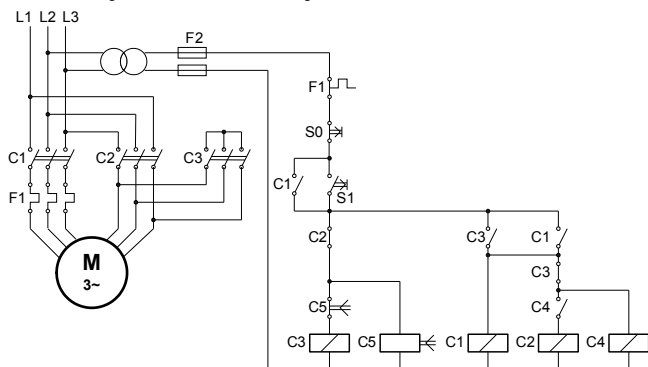
Pritiskom na zeleno tipkalo S1 zatvara se strujni krug kroz špulu (namot) sklopnika C1 pa elektromagnetska sila povuče kotvu i svi njegovi kontakti promijene položaj. Tri glavna kontakta dovedu napon na motor i on se pokrene. Radni pomoćni kontakt spojen paralelno tipkalu S1 se uključi što znači da se tipkalo može otpustiti pri čemu se vraća u otvoreni položaj. Sklopnik sada sam sebe drži uključenog preko vlastitog radnog pomoćnog kontakta. Motor će se isključiti ako napon mreže padne ispod cca 80% jer će elektromagnetska sila postati slabija od sile opruge koja nastoji otpustiti kotvu i otvoriti glavne kontakte. Sklopnik će se također isključiti i ako proradi bimetalna zaštita od preopterećenja F1 pri čemu se otvara njen mirni kontakt i prekida strujni krug kroz špulu sklopnika. Osigurači F2 štite upravljački dio sklopnika od kratkog spoja i njihovim pregorijevanjem se sklopnik također isključi. Normalno gašenje motora izvršava se pritiskom na crveno tipkalo S0 koje prekida

protok struje kroz špulu sklopnika i time isključuje sklopnik a njegovi glavni kontakti isključuju elektromotor. Uputnici motora koji se mogu daljinski uključivati i isključivati imaju paralelno S1 spojeno još jedno zeleno tipkalo, a u seriju s S0 još jedno crveno tipkalo koja se nalaze na mjestu predviđenom za daljinsko upravljanje.

34. UPUĆIVANJE KAVEZNOG ASINKRONOG MOTORA POMOĆU UPUTNIKA ZVIJEZDA-TROKUT

Kako bi se smanjila struja pokretanja većih asinkronih kaveznih motora koristi se uputnik koji namote motora najprije spoji u zvijezdu da bi ih nakon zaleta prespojio u trokut. Motor naravno mora biti predviđen za trajni rad u spoju trokut. U spoju zvijezda su fazni

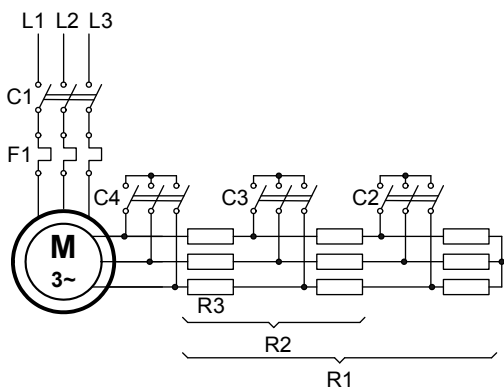
namoti motora spojeni na $\sqrt{3}$ puta manji napon od nominalnog pa kroz njih teče i $\sqrt{3}$ puta manja struja što je u spoju zvijezda ujedno i linijska struja motora (struja u priključnom kabelu). U spoju trokut je linijska struja $\sqrt{3}$ puta veća od fazne koja je kako je već rečeno $\sqrt{3}$ puta veća od struje u zvijezdi (fazne i linijske). To znači da je linijska struja u zvijezdi 3 puta manja od linijske struje u trokutu, odnosno da je strujni udarac pri pokretanju motora smanjen 3 puta. Tri puta je naravno smanjena i snaga motora jer je ona umnožak linijske struje i napona ($P=\sqrt{3}UI\cos\phi$), a prema tome je i potezni moment u zvijezdi 3 puta manji nego u trokutu. Uputnikom zvijezda-trokut mogu se dakle pokretati samo elektromotorni pogoni s vrlo malim početnim momentom tereta (prazni hod, kompresor s otvorenim odzračivanjem, centrifugalne pumpe), a ne mogu npr. teretna vitla kod kojih moment tereta ne ovisi o brzini već na početku doseže svoju maksimalnu vrijednost.



Električna shema uputnika zvijezda trokut je prikazana na slici. U energetske dijelu sheme (lijevo) mogu se uočiti tri sklopnika. Kada su uključeni sklopnici C1 i C3 motor je spojen u zvijezdu. Nakon prve faze zaleta isključuje se sklopnik C3 i uključuje C2 pa motor završava zalet i nastavlja raditi u spoju trokut. F1 je bimetalna zaštita motora od preopterećenja. Sklopnici sami po sebi predstavljaju podnaponsku zaštitu, dok se zaštita od kratkog spoja u pravilu ne stavlja u uputnik već je unutar razdjelnika snage sa kojeg se uputnik napaja ili u slučaju esencijalnih trošila u glavnoj razvodnoj ploči. Upravljački dio uputnika je u ovom slučaju transformatorom odvojen od energetskog dijela. Osigurači F2 štite upravljački dio uputnika od kratkog spoja. Motor se uključuje pritiskom na zeleno tipkalo S1, pri čemu poteče struja kroz špulu sklopnika C3 koji se zbog toga odmah

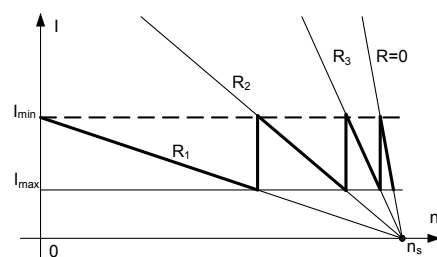
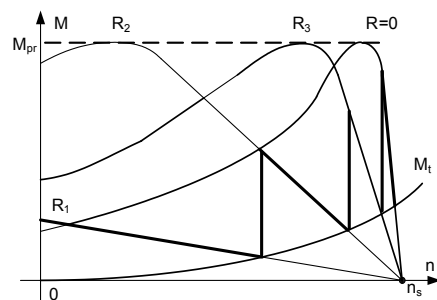
uključi i kroz vremenski relej C5 na kojem je podešeno kašnjenje u trajanju zaleta motora u spoju zvijezda. Vremenski relej C5 će stoga reagirati tek nakon što istekne podešeno vrijeme koje je počeo odbrojivati dolaskom napona na njegove upravljačke stezaljke. Uključivanjem C3 uključuje se i njegov radni kontakt preko kojega se napaja špula C1 koji se stoga također odmah uključuje. Mirni kontakt C3 iznad špule C2 predstavlja blokadu i onemogućuje istovremeni rad C3 i C2 što bi predstavljalo kratki spoj. Istu funkciju ima i mirni kontakt C2 iznad špule C3. Budući da je sklopnik C3 uključen njegov mirni kontakt je otvoren pa prema tome nema napona na špulama C2 i C4. Uključivanjem C1 zatvaraju se njegovi glavni kontakti i motor započinje zalet u spoju zvijezda, ali i njegovi pomoćni radni kontakti: radni kontakt C1 spojen paralelno tipkalu S1 koji drži cijeli sklop uključenim nakon što se tipkalo S1 otpusti i radni kontakt C1 iznad špule C2 koji će držati uključenim sklopnike C1, C2 i C4 nakon što se isključi C3 odnosno kada se motor prespoji iz spoja zvijezda u spoj trokut. Nakon što vremenski relej C5 odbroji podešeno vrijeme (10-20 s) uključuje se njegova špula i otvara mirni kontakt C5 koji isključuje napajanje špule C3 pa se sklopnik C3 isključuje (svi njegovi kontakti se vraćaju u početno stanje – odnosno zauzimaju položaj koji imaju na shemi). Uključivanjem kontakata mirnog kontakta C3 iznad C2 poteče struja kroz špulu releja C4 koji se uključuje, što znači da se i njegov jedini radni kontakt preko kojeg se napaja špula C2 uključuje, pa prema tome poteče struja kroz špulu C2 te se i on uključuje. Glavni kontakti sklopnika C2 spajaju motor u spoj trokut te se on ubrzava do nazivne brzine. Pomoćni kontakt C2 iznad špule C3 se otvara i onemogućuje uključivanje C3, a istovremeno isključuje vremenski relej C5 koji bez zadržke otvara svoj jedini kontakt C5 iznad špule C3. Time je upućivanje motora završeno. Motor se može isključiti: 1) nestankom ili duljim propadom napona, 2) pregrijavanjem osigurača F2, 3) proradom bimetalne zaštite F1 ili 4) jednostavnim pritiskom na crveno tipkalo S0 koje prekida napajanje cijelog upravljačkog dijela uputnika pa sve špule izbace.

35. KOLUTNI ASINKRONI MOTORI

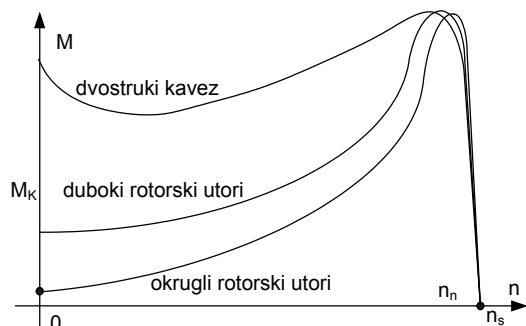


Kolutni asinkroni motori imaju klasičan rotorski namot spojen u zvijezdu čiji slobodni krajevi završavaju na kliznim kolutima. Promjenom otpora priključenog preko ugljenih četkica na klizne kolute mijenjaju se i momentna i strujna karakteristika kolutnog asinkronog motora. Osnovna prednost kolutnog motora je mogućnost pokretanja s velikim poteznim momentom i malom strujom. Nedostaci su mu: kompliciranija i skuplja konstrukcija te klizni kontakti s ugljenim četkicama

koji iskre, troše se i prljaju unutrašnjost motora pa je potrebno redovito održavanje i osjetljiviji rotorski namoti. Kolutni asinkroni motori se upućuju pomoću rotorskog uputnika sastavljenog od više otpornika. Motor se najprije priključi direktno na mrežu preko sklopnika C1. Kako su ostali sklopnici otvoreni, rotor je spojen na najveći mogući otpor R1. Postupnim uključivanjem najprije sklopnika C2, pa C3 smanjuje se otpor u rotorskom krugu, da bi se na kraju uključivanjem sklopnika C4 rotor našao u kratkom spoju. Momentne karakteristike kolutnog motora se s povećanjem otpora u rotorskom krugu „razvlače“ zadržavajući približno isti prekretni moment. Potezni moment se međutim iz početka povećava da bi se kod velikih vrijednosti otpora ponovno počeo smanjivati. Karakteristike struje se također razvlače tako da se uz veći otpor dobije manja struja kratkog spoja odnosno struja pokretanja. Rotorski uputnik se nekad koristio i za regulaciju brzine iako su u tom slučaju, posebno kod malih brzina, prisutni vrlo veliki gubici (uglavnom u uputniku). Omasovljenjem proizvodnje pretvarača frekvencije nestala je potreba za korištenjem asinkronih kolutnih motora na brodovima.



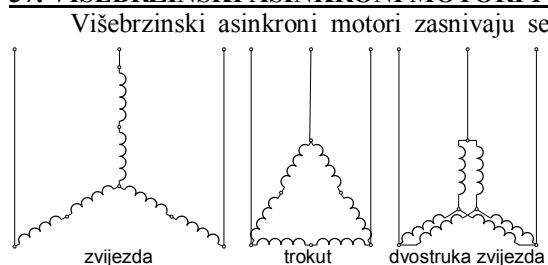
36. ASINKRONI KAVEZNI MOTORI S POTISKIVANJEM STRUJE



Običan asinkroni kavezni motor s okruglim utorima na rotoru pri pokretanju povuče 5÷7 puta veću struju od nazivne i ima vrlo mali potezni moment. Kod rotora s vrlo dubokim utorima i pogotovo s dvostrukim kavezom induktivitet dijela rotorskih štapova koji se nalaze dublje u željezu rotora veći je nego kod dijelova koji su bliže površini. Frekvencija rotorske struje je proporcionalna klizanju i frekvenciji mreže ($f_2 = sf_1$) pa je u trenutku uključanja motora dok rotor još stoji uz klizanje $s=1$ najveća (60Hz) a tijekom zaleta pada do cca 3Hz kod nazivne brzine. To je vrlo niska frekvencija kod koje induktivitet nema značajnog upliva na rotorsku struju. Nasuprot tome, kod 60Hz na početku zaleta, induktivni otpor koji je veći u dubljim dijelovima rotorskih vodiča potiskuje struju prema površini rotora gdje je otpor njenom prolasku manji. To se na vanjskim karakteristikama motora (struji i momentu) odražava kao privremeno povećanje otpora rotora slično kao kod kolutnih

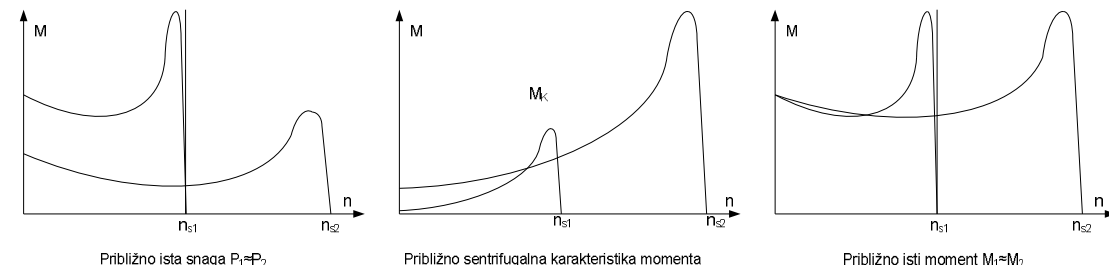
asinkronih motora s rotorskim uputnikom pa je shodno tome potezni moment veći a struja pokretanja (struja kratkog spoja) manja. Motori s potiskivanjem struje se koriste u elektromotornim pogonima koji zahtijevaju veliki potezni moment poput dizalica, sidrenog i priteznog vitla.

37. VIŠEBRZINSKI ASINKRONI MOTORI I DAHLANDEROVI SPOJEVI

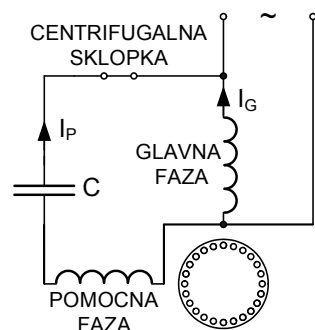


Višebrazinski asinkroni motori zasnivaju se na promjeni sinkrone brzine promjenom broja pari polova statorskog namota. Općenito postoje tri izvedbe: 1) s odvojenim zasebnim namotima za svaku brzinu, 2) s preklapanjem polova (polnopraklopivi) na principu Dahlanderovih spojeva i 3) kombinacija zasebnog namota i namota u Dahlanderovim spojevima. U varijanti zasebnih namota uključuje se za određenu brzinu vrtnje odgovarajući namot dok su drugi namoti izvan funkcije. Polnopraklopivi motor predviđen za preklapanje po Dahlanderovim spojevima ima fazne namote podijeljene na dva dijela koji se spajaju na nekoliko načina. Osnovni spojevi su: zvijezda, dvostruka zvijezda i trokut. Ovisno od namjene motora koriste se

različite kombinacije spojeva. Kombinacija približno iste snage se koristi kada je potreban veliki potezni i nazivni moment kod male brzine, a dovoljan je manji kod veće brzine (sidrena i pritezna vitla). Kombinacija približno centrifugalne karakteristike koristi se kod centrifugalnih tereta koji imaju mali moment kod niže brzine a veći kod više brzine (ventilatori, centrifugalne pumpe, pramčano kormilo). Kombinacija s približno istim momentom se koristi kod potencijalnih tereta gdje je potreban isti moment kod veće i manje brzine (teretno vitlo).



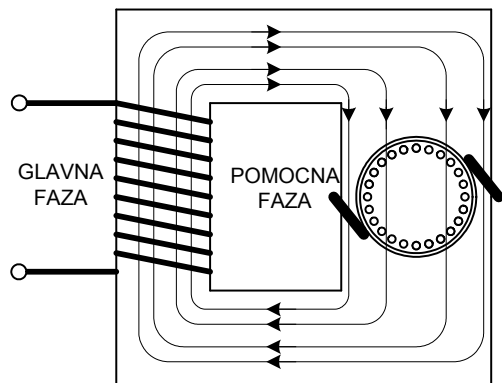
38. JEDNOFAZNI ASINKRONI MOTOR S KONDENZATOROM



Uvjet za stvaranje okretnog magnetskog polja su najmanje dva prostorno pomaknuta namota kroz koje teku fazno (vremenski) pomaknute struje. Zbog toga jednofazni asinkroni motor na statoru pored glavnog namota (faze) ima i jedan pomoćni namot (fazu). Dok se glavna faza spaja na izmjeničnu mrežu direktno, pomoćna se faza spaja preko serijski spojenog kondenzatora koji njenoj struji I_P daje fazni pomak u odnosu na struju glavne faze I_G . Okretno magnetsko polje statora siječe vodiče rotora pa se u njima inducira napon koji potjera struju, a na vodič (rotora) koji se nalazi u magnetskom polju (statora) ako kroz njega teče struja djeluje sila koja zakreće rotor u smjeru vrtnje okretnog magnetskog polja. Poput trofaznog ni jednofazni asinkroni motor se ne može okretati sinkronom brzinom jer bi se kod sinkrone brzine rotorski vodiči i silnice okretnog magnetskog polja okretali istom brzinom odnosno jedno naspram drugoga mirovali. Drugim riječima ne bi bilo presijecanja vodiča rotora od strane silnica okretnog magnetskog polja statora, pa ni induciranog napona, kao ni struje na rotoru, a prema tome ni elektromagnetske sile. Stari motori su koristili

elektrolitske kondenzatore koje je neposredno nakon pokretanja trebalo isključiti jer nisu mogli ostati spojeni na izmjeničnu struju dulje od 30-tak sekundi, o čemu se brinula centrifugalna sklopka spojena u seriju s pomoćnom fazom. Iako bi ostao bez okretnog magnetskog polja motor se i dalje vrtio jer su vodiči rotora nakon pokretanja sjekli silnice statorskog pulsirajućeg polja što je uzrokovalo pojavu induciranog napona, struje i konačno elektromagnetske sile odnosno momenta. Jednofazni asinkroni motor s pomoćnom fazom i kondenzatorom u pravilu ne može krenuti bez pomoćne faze ali kada ga se pokrene radi normalno i bez nje. OPREZ: Neopterećeni motor ipak zna ponekad krenuti i bez pomoćne faze.

39. JEDNOFAZNI ASINKRONI MOTOR S KRATKO SPOJENOM POMOĆNOM FAZOM



Glavni namotaj priključen na jednofazni izmjenični izvor napona stvara izmjenični magnetski tok koji osim kroz rotor prolazi i jednim dijelom kroz stator gdje se zbog njega u prostorno zakrenutim kratko spojenim namotajima pomoćne faze inducira napon po principu transformatora. Inducirani napon zaostaje 90° za glavnim magnetskim tokom tako da i struja pomoćne faze vremenski (fazno) jako zaostaje za strujom glavne faze. To znači da su ispunjeni uvjeti za stvaranje okretnog magnetskog polja (prostorno pomaknuti namoti i vremenski pomaknute struje). Silnice okretnog magnetskog polja sijeku vodiče rotora pa se u njima inducira napon koji potjera struju, a na vodič (rotora) koji se nalazi u magnetskom polju (statora) ako kroz njega teče struja djeluje sila koja zakreće rotor. Kao ni svi drugi asinkroni motori niti ovaj ne može stvarati moment kod sinkrone brzine jer se tada rotor i magnetsko polje statora okreću istom brzinom pa nema presijecanja silnica, a prema tome ni napona na rotoru. Motoru nije moguće promijeniti smjer vrtnje osim ako se ne premontira rotor.

40. ODRŽAVANJE ASINKRONIH MOTORA

Asinkroni kavezni motori ne zahtijevaju posebnu pažnju. U pravilnim vremenskim razmacima treba kontrolirati i bilježiti očitavanje otpora izolacije namota kao i vibracija na ležajevima u horizontalnom, vertikalnom i uzdužnom smjeru. Ležajeve treba pravovremeno promijeniti. Treba paziti da su kontakti u priključnoj kutiji čisti i čvrsto zategnuti te da je kućište motora čisto bez naslaga prašine, kao i da je zaštićeno od korozije ne predebelim slojem boje. Kolutnim motorima je potrebno redovito kontrolirati duljinu četkica i silu kojom pritišću klizne kolute kao i njihovu površinu, te ih ponekad očistiti od ugljene prašine. Iako su svi asinkroni motori opremljeni zaštitom od preopterećenja dobro je svakodnevno na kontrolnom ampermetru kontrolirati njihovu struju. Time se u stvari kontrolira stanje pogonjenog mehanizma (pumpe, kompresora...). Premala struja motora znači da motor radi rasterećen.

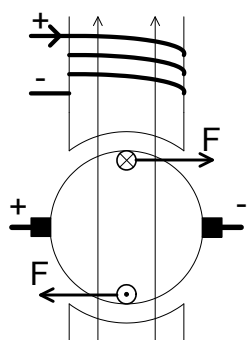
41. KVAROVI ASINKRONIH MOTORA

Kao i transformatori asinkroni motori mogu imati tri vrste električkih kvarova: spoj s masom, kratki spoj i prekid strujnog kruga. U slučaju **spoja s masom** javlja se na brodu alarm niskog otpora izolacije u sustavu. Otpor izolacije statorskih namota prema masi se u isključenom stanju ispituje megaometrom (megerom). Najmanji dozvoljeni otpor je $1\text{ k}\Omega/\text{V}$, dakle $440\text{ k}\Omega$ za napon od 440 V . Ukoliko je otpor niži može se pokušati sa sušenjem. Ako je u motor ušla morska voda treba ga rastaviti i isprati slatkom vodom, odmastiti namote pa tek onda pristupiti sušenju koristeći žarulju za grijanje ili aparat za zavarivanje kao izvor jake struje malog napona. Nakon što je motor osušen (uzastopna mjerenja između intervala sušenja pokazuju isto očitavanje otpora izolacije, namoti se mogu prelakirati kako bi se otežao pristup vlazi. Ako sušenje ne daje rezultata, a nema vidljivih spojeva s masom na priključcima, motor mora u servis na prematanje. **Kratki spoj** se manifestira pregaranjem osigurača odmah po uključenju transformatora na mrežu. U tom slučaju najprije treba provjeriti da li se osovina motora slobodno okreće. Nakon odspajanja svih faznih namota treba provjeriti otpor izolacije svake faze (namota) prema masi i svih faza međusobno. Ukoliko je motor mokar može ga se pokušati osušiti. Ako je sve ispravno treba izmjeriti otpor namota u hladnom stanju i usporediti ga s podacima s ispitnog lista odnosno otporom na drugim fazama. Ako je jedan otpor znatno manji znači da je došlo do kratkog spoja između susjednih zavoja na istom namotu (fazi) i transformator mora u servis na prematanje. U slučaju **prekida** na dva ili tri priključka 3f asinkroni motor ne kreće i ne bruji. Ako je prekid na samo jednom priključku (fazi) motor bruji i u pravilu ne kreće osim iznimno i to samo ako je neopterećen (slobodni rotor se može pokrenuti rukom baš kao i kod jednofaznog motora koji je ostao bez pomoćne faze). Asinkroni motori su posebno osjetljivi na **prenizak napon napajanja** (najčešće je posljedica prevelikog pada napona u dugačkim kabelima) koji ne smije biti niži za više od 5% nazivnog napona. Moment motora pada s kvadratom napona tako da mu brzina znatno padne a to ima za posljedicu povećanje klizanja a prema tome i gubitaka pa se motor pregrijava. Isto se događa i ako motor predviđen za rad u spoju trokut ostane raditi u zvijezdi. Motor će se pregrijavati i kada je preopterećen što je najlakše ustanoviti očitavanjem prevelike struje na ugrađenom ampermetru ili još preciznije mjerenjem brzine vrtnje ili klizanja stroboskopskom lampom (brzina je manja od nazivne). Ako bimetalna zaštita izbaci motor tijekom zaleta, najvjerojatnije je neispravna zaštita (s vremenom je izgubila preciznost), ali može biti i produljeni start motora zbog prevelikog tereta ili preniskog napona na motoru. Od mehaničkih kvarova najčešći je oštećenje ležajeva. Moguća je i **blokada osovine** od strane pogonjenog radnog mehanizma u kom slučaju pregore osigurači odmah po uključenju motora.

2.KOLOKVIJ

KOLEKTORSKI (ISTOSMJERNI) STROJEVI

42. PRINCIP RADA ISTOSMJERNOG MOTORA



Na statoru istosmjernog motora se namotani na glavne polove nalaze uzbudni namoti kroz koje teče istosmjerna uzbudna struja i stvara glavno magnetsko polje koje je kao i struja koja ga je stvorila nepromjenljivo. Istosmjerna armaturna struja privedena motoru se preko ugljenih četkica i kolektora komutira (pretvara u izmjeničnu) i prenosi na rotorske (armaturne) vodiče koji su smješteni u utorima rotorskog paketa dinamo limova (željeza). Na rotorske vodiče kojima teče izmjenična struja a nalaze se u magnetskom polju statora djeluje sila koja zakreće rotor. Kroz rotorske vodiče teče struja samo dok prolaze ispod glavnih polova jer se u tom trenutku i lamele na kolektoru preko kojih se napajaju nalaze ispod četkica. Rotorska struja mora biti izmjenična kako bi vodiči dok prolaze ispod sjevernog pola imali suprotan smjer struje nego dok prolaze ispod južnog pola jer se tako dobiva elektromagnetska sila suprotnog, a

razvijeni moment istog smjera. Smjer vrtnje istosmjernog motora mijenja se tako da se promijeni smjer elektromagnetske sile a to je moguće napraviti na dva načina: 1) Promjenom smjera uzbudne struje (zamjenom polariteta na uzbudnom namotaju) ili 2) promjenom smjera armaturne struje (zamjenom polariteta na četkicama). Istosmjerni motori se više ne koriste jer su skuplji i kompliciraniji za održavanje zbog kolektora i četkica. Njihova je osnovna prednost bila u jednostavnoj regulaciji brzine u širokom opsegu uz pomoć najprije otpornika a kasnije tiristorskih ispravljača. Danas se za istu svrhu koriste asinkroni i sinkroni motori napajani iz pretvarača frekvencije.

43. PRINCIP RADA ISTOSMJERNOG GENERATORA

Svaki električni rotacijski stroj pa tako i istosmjerni stroj može raditi kao motor i kao generator, samo je tok energije a prema tome i princip rada drugačiji. Kao i kod istosmjernog motora na statoru se namotani na glavne polove nalaze uzbudni namotaji kroz koje teče istosmjerna uzbudna struja koja stvara glavno magnetsko polje koje je kao i struja koja ga je stvorila nepromjenljivo. Uzbudni namoti najčešće su spojeni na armaturne stezaljke (četkice) u kom slučaju uzbudnu struju daje sam generator koji se prema tome naziva samouzbudnim. Pogonski stroj okreće rotor na kojem se u utorima rotorskog paketa limova (željezo) nalaze rotorski (armaturni) vodiči koji pri tome sijeku silnice magnetskog (glavnog) polja statora, te se u njima inducira napon. Kako rotorski vodiči prolazeći ispod sjevernog pola sijeku silnice polja u jednom, a prolazeći ispod južnog pola u drugom smjeru, induciraju se pri tome naponi suprotnog polariteta, što znači da na rotorskim vodičima vlada izmjenični napon i da njima kad je generator opterećen teku izmjenične struje. Kolektor i četkice ispravljaju izmjenični rotorski napon tako da na četkicama pričvršćenim na stator vlada istosmjerni napon na koji se priključuju istosmjerna trošila. Istosmjerni generatori su prije prelaska na izmjeničnu struju predstavljali osnovne izvore električne energije na brodu. Kasnije su se koristili u sklopu Ward-Leonardovih pogona koji su omogućavali preciznu regulaciju brzine vrtnje palubnih strojeva, a u slučaju električne propulzije i brodskog vijka. Nestali su pojavom tiristorskih ispravljača. Danas se još susreću u starijim ispitnim stanicama kao dinamo-vage za mjerenje momenta ne samo električnih strojeva kod različitih brzina vrtnje te kao tahogeneratori (senzori brzine vrtnje).

44. VRSTE UZBUDE ISTOSMJERNIH STROJEVA

Uzbudni (statorski) namoti istosmjernih strojeva mogu se spajati u seriju i u paralelu s armaturnim (rotorskim) namotima. Tako razlikujemo serijsku, porednu (paralelni spoj) i kompaundnu (kombinacija serijske i poredne) uzбудu. Ako su uzbudni namoti spojeni na poseban, odvojeni, izvor napajanja riječ je o nezavisnoj uzbuđi koja se dosta koristila u posljednjoj generaciji elektromotornih pogona s istosmjernim motorima koji su bili napajani preko tiristorskih ispravljača. Kod serijske uzbuđe je uzbudni namot spojen u seriju s armaturnim, pa kroz njih teče ista (velika) struja. Kod poredne uzbuđe je uzbudni namot spojen paralelno armaturnom, tanji je i kroz njega teče mnogo manja struja od armaturne. Na starim brodovima su se uglavnom koristili kompaundni motori i generatori a kasnije motori s nezavisnom uzbuđom. Serijska uzbuđa je još uvijek interesantna zbog pogona viljuškara i univerzalnih motora, a nezavisna se još susreće na starim dizalicama.

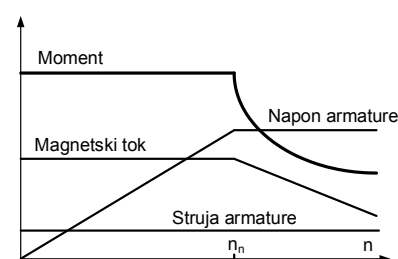
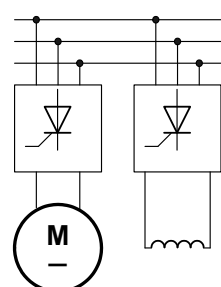
45. UNIVERZALNI MOTOR

Iako su istosmjerni strojevi potpuno nestali iz upotrebe, jedna se njihova inačica - univerzalni motori - ne samo zadržala u proizvodnji već predstavlja najšire korišten motor u uređajima široke potrošnje. Univerzalni motori se teoretski mogu spojiti na izmjeničnu i na istosmjernu struju iako se u pravilu koriste samo za izmjeničnu. Zasnivaju se na vrlo jednostavnoj ideji: Smjer vrtnje istosmjernog motora ostaje isti ako mu se istovremeno promijene smjerovi uzbudne i armaturne struje. Motor sa **serijskom** uzbuđom kojemu je struja armature ujedno i uzbudna struja može se dakle priključiti na izmjeničnu mrežu pa će u pozitivnoj i negativnoj polu-periodi stvarati moment u istom smjeru. Izmjeničnoj struji suprotstavlja se i vrlo veliki induktivitet posebno uzbudnih namota tako da je za rad na izmjeničnom priključku motoru potrebno dovesti veći napon nago kod priključka na istosmjernu struju. Kako je zbog serijskog spoja uzbudna struja univerzalnog motora je ujedno i armaturna struja, kod pokretanja (svako

pokretanje je kratkotrajni kratki spoj), kada motorom teče velika armaturna struja, motor ima i snažnu uzbuđu što mu kao rezultat daje vrlo veliki moment pokretanja. Nasuprot tome ako bi se serijski motor uključio neopterećen, u trenu bi se zbog male struje i prema tome male uzbuđe, zavrteo vrlo velikom brzinom te bi zbog centrifugalnih sila došlo do njegovog uništenja i velike opasnosti za okolinu. Univerzalni motori se koriste za ručne električne alate (bušilice, brusilice...), kućanske aparate (miksere, usisivače...) ali i za npr. napinjanje prekidača. Prednost im je što im maksimalna brzina vrtnje nije ograničena frekvencijom kao kod sinkronih i asinkronih motora (max 3600 o/min kod 60Hz) pa se mogu vrtjeti vrlo velikim brzinama (do 40 000 o/min). Zbog toga su za istu snagu desetak puta manji i jeftiniji od asinkronih motora. Takvi elektromotorni pogoni naravno obavezno koriste reduktor za smanjenje brzine.

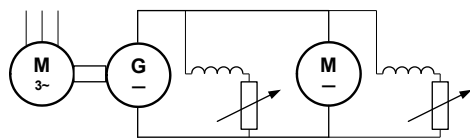
46. REGULACIJA BRZINE VRTNJE ISTOSMJERNOG MOTORA S NEZAVISNOM UZBUĐOM

Zasebnim tiristorskim ispravljačkim mostovima regulira se napon armature i struja uzbuđe istosmjernog motora. Do nazivne brzine struja uzbuđe a time i magnetski tok se drže na maksimalnoj (nazivnoj) vrijednosti, dok se napon armature povećava sve do nazivnog napona. Pri tome motor kod svih brzina manjih od nazivne može razviti nominalni moment. Brzinu je moguće povećati preko nazivne tako da se smanjuje struja uzbuđe a time i magnetski tok. Nažalost tako se smanjuje i razvijeni moment koji je kod brzina većih od nazivne manji od nazivnog. Struja armature u cijelom području rada



ne prelazi nazivnu vrijednost. Kako je armaturna struja mnogo veća od uzbudne tiristorski most u njenom krugu je mnogo snažniji od onog u uzбудnom. Njegova snaga u stvari otprilike odgovara nazivnoj snazi motora kojeg pogoni.

47. WARD-LEONARDOV SPOJ



Ward-Leonardov spoj se u doba prije pojave tiristora često koristio za finu regulaciju broja okretaja istosmjernog motora u širokom rasponu brzina. Princip regulacije brzine je isti kao kod nezavisno uzbuđenog motora samo što se kao izvor istosmjerne struje za istosmjerni motor koristio samouzbudni istosmjerni generator kojeg je pogonio asinkroni kavezni motor. Napon armature istosmjernog motora regulirao se podešavanjem uzbudne struje generatora odgovarajućim potencijetrom a magnetski tok promjenom njegove uzbudne struje drugim potencijetrom. Karakteristike momenta, struja i napona bile su iste kao kod nezavisne uzbuđe.

48. OSNOVNE JEDNADŽBE ISTOSMJERNOG STROJA

$$M = k_M \Phi I_a$$

Moment je proporcionalan magnetskom toku (struji uzbuđe) i struji armature.

$$\Phi = k_u I_u$$

Glavni magnetski tok je proporcionalan struji uzbuđe.

$$E = k_e n \Phi$$

Inducirani napon je proporcionalan broju okretaja i magnetskom toku.

$$U_a = E + I_a R_a + \Delta U_c$$

Napon na stezaljkama motora je inducirani napon E (napon induciran u namotima motora) uvećan za padove napona na otporu armature $I_a R_a$ i četkicama ΔU_c (2V bez obzira na struju)

$$U_a = E - I_a R_a - \Delta U_c$$

Napon na stezaljkama generatora je inducirani napon E umanjen za padove napona na otporu armature $I_a R_a$ i četkicama ΔU_c (2V bez obzira na struju)

49. REAKCIJA ARMATURE

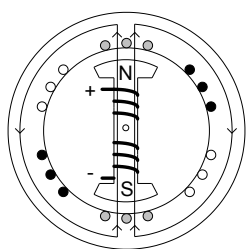
Reakcija armature je magnetsko polje koje stvara armaturni (rotorski) namot kada kroz njega teče struja. Kako je armaturna struja tim veća što je veće opterećenje motora (ili generatora) tako je i reakcija armature tim jača što je veće opterećenje. Reakcija armature ima dva negativna učinaka na rad istosmjernog stroja: 1) pomiče neutralnu zonu i tako otežava komutaciju armaturne struje pa može nastati iskrenje između četkica i kolektora; 2) reakcija armature iskrivljuje magnetsko polje pod polovima i tako smanjuje snagu istosmjernog stroja. Neutralna zona je područje između glavnih polova na statoru u kojem se vodiči rotora kreću u smjeru magnetskog polja, tako da u tom trenutku u njima nema induciranog napona. Kako bi se izbjeglo pretjerano iskrenje, položaj četkica mora (zakretanjem obruča na koji su montirani nosači četkica) biti podešen tako da se struja armaturnih vodiča isključuje i uključuje dok se oni nalaze u neutralnoj zoni. Kako se jačina reakcije armature mijenja s opterećenjem baš kao i položaj neutralne zone, četkice se ne bi mogle podesiti tako da njihov položaj odgovara za sva opterećenja. Zbog toga se na veće motore ugrađuju pomoćni polovi koji su smješteni između glavnih polova i spojeni u seriju s armaturom, te svojim djelovanjem poništavaju utjecaj reakcije armature na pomicanje neutralne zone. Problem iskrivljenja magnetskog polja pod glavnim polovima rješava se na većim strojevima ugradnjom kompenzacijskih namota u same polne papuče glavnih polova. Kompenzacijski namoti se također spajaju u seriju s armaturnim tako da je i njihovo djelovanje proporcionalno djelovanju reakcije armature.

50. ODRŽAVANJE ISTOSMJERNIH STROJEVA

Istosmjerni strojevi zahtijevaju najviše pažnje, ali ako su redovito održavani imaju isti radni vijek kao i sinkroni i asinkroni strojevi. Pored kontrole vibracija ležaja i otpora izolacije, redovito treba kontrolirati i iskrenje između kolektora i četkica. Iskrenje se smije biti predugo niti na ulaznom niti na izlaznom bridu. Sila kojom četkice pritišću kolektor mora biti odgovarajuća. Prevelika sila ubrzava trošenje četkica i kolektora, a premala izaziva poskakivanje i stoga iskrenje sa sličnim posljedicama. Četkice treba pravovremeno promijeniti prije nego što se potpuno istroše jer istrošene četkice mogu uništiti rotorske namote. Nove četkice moraju biti originalnih dimenzija i tvrdoće. Mijenjaju se sve četkice odjednom (ili barem sve pozitivne odnosno negativne) kako bi bile iste duljine a time i struja ravnomjerno raspoređena po namotima rotora. Površina kolektora može zbog pretjeranog iskrenja postati hrapava a s vremenom se ispod četkica od trošenja naprave žlijebovi pa je treba pretokariti. Izolaciju između lamela kolektora treba pravovremeno, a posebice nakon tokarenja, isturpijati kako ne bi s trošenjem lamela izašla na površinu i potrošila četkice. Pomoćni polovi i položaj četkica moraju biti dobro podešeni (u servisu) kako bi se smanjilo iskrenje.

SINKRONI STROJEVI

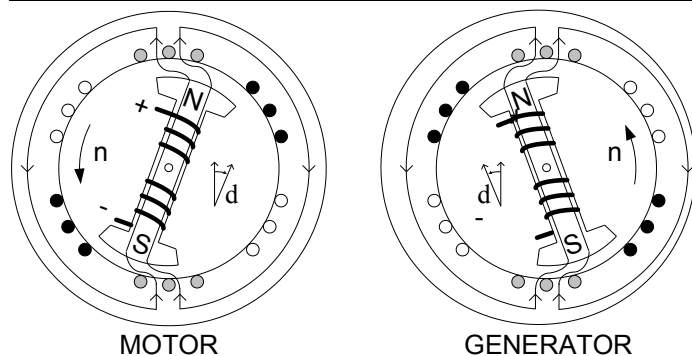
51. SINKRONI GENERATORI



Sinkroni generatori pretvaraju mehaničku energiju dobivenu od pogonskog stroja (dizel motora ili turbine) u električnu energiju koju predaju mreži (trošilima) i osnovni su izvori električne energije na brodu. Uzbuđni namoti sinkronog generatora smješteni su na rotoru. Kroz njih teče istosmjerna struja i tako stvara nepromjenljivo magnetsko polje koje se zatvara kroz statorsko željezo. Pogonski stroj okreće rotor konstantnom brzinom pri čemu se zajedno s rotorom okreće i njegovo magnetsko polje. Silnice polja pri vrtnji sijeku statorske vodiče u kojima se zbog toga inducira napon. Statorski napon je trofazni. Kako su tri faze statora prostorno pomaknute u njima se induciraju vremenski pomaknuti naponi. Tako nastaje trofazni sustav napona koji međutim dok nema priključene potrošnje ne može potjerati nikakvu struju pa statorski namoti u kada je generator u praznom hodu ne stvaraju magnetsko polje. Kada se na njega priključe trošila, inducirani napon kroz statorske vodiče generatora potjera struje pa budući da se vodiči nalaze u magnetskom polju rotora nastane sila, odnosno moment, koji se suprotstavlja njegovoj vrtnji (koči ga). Što je opterećenje generatora [kW] veće to je veća i kočna sila pa pogonski

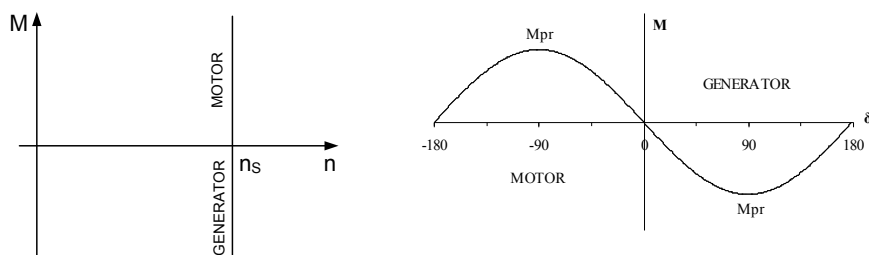
stroj (dizel motor) mora dati veću snagu kako bi se zadržao konstantan broj okretaja. Napon generatora regulira se strujom uzbude a frekvencija brojem okretaja pogonskog stroja (dizel motora).

52. REAKCIJA ARMATURE SINKRONOG GENERATORA I KUT OPTEREĆENJA



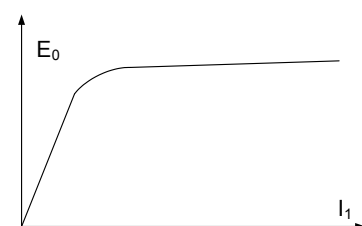
Da bi se bolje shvatile prilike u sinkronom generatoru, potrebno je analizirati i magnetsko polje koje stvaraju statorski (armaturni) namoti opterećenog sinkronog generatora a naziva se **reakcija armature**. Kako je riječ o trofaznim prostorno pomaknutim namotima kroz koje teku vremenski pomaknute struje, reakcija armature je u biti okretno magnetsko polje koje se vrti sinkronom brzinom bas kao i rotor sa svojim nepromjenljivim glavnim magnetskim poljem, stvorenim istosmjernom uzбудnom strujom što teče njegovim uzбудnim namotom. Gledano iz koordinatnog sustava rotora ta dva polja jedno naspram drugoga miruju pa se mogu jednostavno vektorski zbrojiti tako da se dobije rezultantno magnetsko polje u generatoru. Kut δ , između rezultantnog magnetskog polja i glavnog magnetskog polja (osi rotora) naziva se **kut opterećenja** i presudno određuje smjer i veličinu momenta kojeg razvija sinkroni stroj: $M = M_{PR} \sin \delta$. Ako moment sinkronog stroja toliko naraste da pređe prekretni moment, odnosno granicu stabilnosti (teoretski 90° a praktično nešto manje), dolazi do pucanja magnetskih silnica i tzv. preskoka (rotor se pokušava "zakačiti" za silnice okretnog magnetskog polja kod sljedećeg prolaska). Kod generatora opterećenog i djelatnom snagom (kW) kut opterećenja je negativan jer rezultantno polje zaostaje za rotorom budući da ga tako koči. Kod sinkronog motora koji pokreće neki radni mehanizam i pri tome daje mehaničku snagu na osovinu, kut opterećenja je pozitivan jer rotor zaostaje za rezultantnim poljem.

53. MOMENTNA KARAKTERISTIKA SINKRONOG STROJA



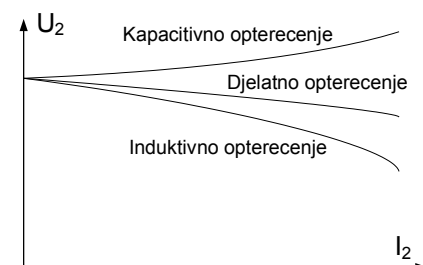
momenta koji se postiže kod kuta $\delta = 90^\circ$ (granica stabilnosti), nakon kojeg moment motora počne padati što znači da je moment tereta veći od momenta stroja i dolazi do već opisanog preskoka.

54. KRIVULJA PRAZNOG HODA SINKRONOG GENERATORA



Krivulja praznog hoda pokazuje ovisnost induciranog napona u praznom hodu E_0 o uzбудnoj struji I_1 sinkronog generatora. Snima se tako da se neopterećenom generatoru uz održavanje konstantne brzine vrtnje polako povećava struja uzbude i pri tome mjeri napon na stezaljkama U_2 . Kako nema priključenog opterećenja pa prema tome ni struje ni padova napona na impedanciji statora, a nema ni reakcije armature, izmjereni napon je u stvari inducirani napon E_0 .

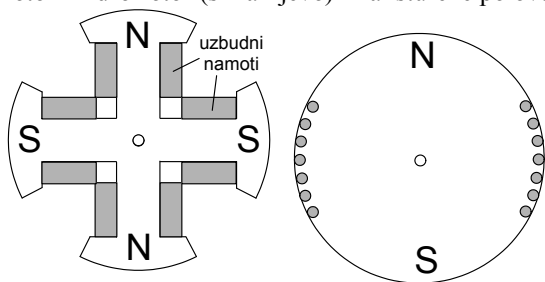
55. PAD NAPONA KOD OPTEREĆENJA SINKRONOG GENERATORA



Napon na stezaljkama brodskih sinkronih generatora pada s povećanjem opterećenja (struje). Pad napona je kod sinkronih generatora mnogo izraženiji nego kod transformatora jer pored pada napona na impedanciji statorskog namota dolazi i do pada napona zbog djelovanja reakcije armature koja slabi rezultantni magnetski tok. Zbog vektorskog zbrajanja statorskog okretnog magnetskog polja (reakcije armature) i rotorskog (glavnog) magnetskog polja, rezultantno magnetsko polje može biti veće ili manje od glavnog magnetskog polja, zavisno od kuta među njima koji opet ovisi o vrsti opterećenja (induktivnom karakteru priključene potrošnje). Kako je inducirani napon u generatoru proporcionalan veličini magnetske indukcije to znači da reakcija armature može svojim djelovanjem povećavati ili smanjivati inducirani napon a time i napon na generatoru. Kod djelatnog i posebno kod induktivnog opterećenja, reakcija armature slabi glavno magnetsko polje što ima za posljedicu smanjenje induciranih napona. Kod kapacitivnog opterećenja (nema ga na brodu) reakcija armature jača glavno magnetsko polje pa se inducirani napon povećava. Smanjenje i povećanje induciranih napona zbog reakcije armature, prati i smanjenje napona zbog pada napona na impedanciji statorskog namota pa je ukupni pad napona jako velik. Ipak, kako su brodski sinkroni generatori opremljeni kompaundnim transformatorima i automatskim regulatorima napona koji povećanjem uzбудnih struja kompenziraju promjene napona kod opterećenja, ovi propadi napona čine se u praksi mnogo manjim nego što stvarno jesu.

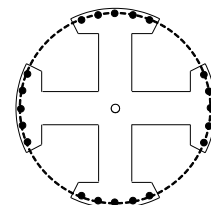
56. KONSTRUKCIJA ROTORA SIKRONOG GENERATORA

Zavisno prije svega od nazivnog broja okretaja sinkroni generator može imati dvije različite vrste rotora: hidro-rotor i turbo-rotor. Hidro-rotor (slika lijevo) ima isturene polove na koje su namotani uzбудni namoti. Relativno je velikog promjera i male duljine.



Takva konstrukcija zbog jakih centrifugalnih sila teško podnosi velike brzine pa nije pogodan za brzine veće od 1500 o/min. Turbo rotor (slika desno) je kompaktne izvedbe s uzbudnim namotima dobro učvršćenim u utorima. Relativno je malog promjera i velike duljine i podnosi mnogo veće brzine. Koristi se za brzine od 1000 o/min naviše.

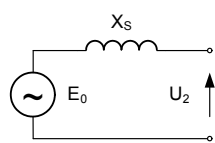
Prigušni kavez je poseban dodatni rotorski namot koji svojim oblikom odgovara rotorskom namotu kaveznog asinkronog motora. Smješten u uture u polovima rotora i ima više funkcija: 1) Kod pogona generatora dizel-motorom nastaju torzione vibracije (trzaji) u osovini



povezane s taktovima cilindara motora. Zbog toga je važno da dizel-motori za pogon generatora imaju što veći broj cilindara ili alternativno jaki zamašnjak. Prigušni kavez predstavlja asinkroni kavezni motor i prema tome daje pozitivni moment kada brzina rotora padne ispod sinkrone (ubrzava rotor), a negativni kada brzina pređe sinkronu brzinu (usporava rotor). Na taj način smanjuje amplitudu torzionih vibracija i prigušuje njihano rotora oko sinkrone brzine. 2) Prigušni kavez smanjuje početnu reaktanciju generatora X_d a time i harmoničko izobličenje napona brodske mreže kad su na nju priključeni pretvarači frekvencije ili ispravljači. 3) Prigušni kavez se ponekad koristi i za tzv. asinkroni start sinkronog motora pri kojem se sinkroni motor s isključenom uzбудom priključi na mrežu i zaleti se kao asinkroni kavezni motor. Uzбудni namot za vrijeme zaleta mora biti spojen na poseban otpornik kako mu zbog velikog induciranog napona ne bi probila izolacija.

57. NADOMJESNA SHEMA SINKRONOG GENERATORA

Uglavnom se koristi pojednostavljena nadomjesna shema sa sinkronom reaktancijom X_s koja je veća od rasipne reaktancije statorskog namota jer u sebi aproksimira (približno uzima u obzir) i djelovanje reakcije armature na pad napona kod opterećenja generatora. Da bi se to postiglo zanemaren je otpor statorskog namota, a krivulja magnetiziranja je u dijelu oko radne točke linearizirana (smatra se pravcem). Nadomjesna shema omogućuje jednostavno izračunavanje pada napona na generatoru u stacionarnom radu kod svih vrsta opterećenja. Kod dinamičkih stanja kao što je npr. kratki spoj pojednostavljena nadomjesna shema koja koristi sinkronu reaktanciju može se primijeniti samo ako se uvedu još dvije različite reaktancije za različite brzine promjene struje.



Sinkrona reaktancija se koristi za izračunavanje trajne struje kratkog spoja i pada napona kod stacionarnog opterećenja. Početna (subtranzijentna) reaktancija X_d je mnogo manja od X_s i koristi se za izračunavanje početne struje kratkog spoja kao i harmoničkog izobličenja napona uzrokovanog višim harmonicima u struji generatora. Prijelazna (tranzijentna) reaktancija X_d' služi za izračunavanje struje kratkog spoja između početne i trajne vrijednosti. Početnu reaktanciju imaju samo generatori s prigušnim kavezom kod kojih se upravo prigušni kavez velikom strujom suprotstavlja promjeni magnetskog toka u prvim trenucima

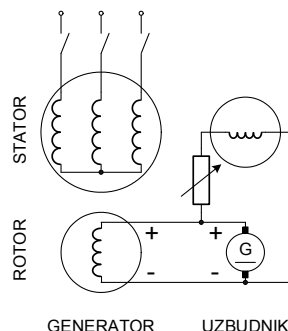
kratkog spoja kada statorom poteku vrlo velike struje koje kroz reakciju armature ruše magnetsko polje u generatoru. Inducirani naponi u prigušnom kavezu potjeraju velike struje koje nastoje zadržati magnetski tok u stroju nepromijenjenim. Zbog relativno malog induktiviteta i prema tome male energije pohranjene energije ovo djelovanje prigušnog kaveza je vrlo brzo ali i vrlo kratko. Uzбудni namot ima mnogo zavoja i prema tome veći induktivitet i magnetsku energiju pa se dulje vrijeme opire promjeni magnetskog toka ali sa manjim efektom. Djelovanje uzbudnog namota predloženo je prijelaznom reaktancijom X_d' . Nakon što je potrošena i energija uzbudnog namota struja kratkog spoja padne na trajnu vrijednost određenu sinkronom reaktancijom.

58. INVERTIRANI SINKRONI GENERATOR

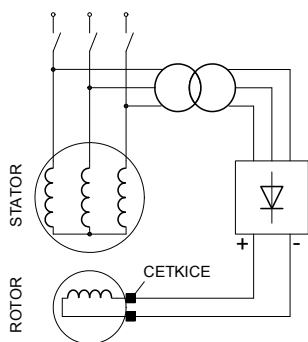
Invertirani sinkroni generatori su se proizvodili i ugrađivali na brodove u godinama nakon prelaska s istosmjerne na izmjeničnu struju jer je tehnologija njihove izrade vrlo slična tehnologiji izrade istosmjernog generatora. Kod invertiranog sinkronog generatora su zamijenjene uloge statora i rotora i jako nalikuje na istosmjerni generator. Uzбудni istosmjerni namoti se nalaze na polovima statora. Kada kroz njih teče istosmjerna struja stvara se vremenski nepromjenljivo glavno magnetsko polje. Pogonski stroj vrti rotor konstantnom brzinom pa njegovi trofazni namoti sijeku silnice statorskog polja te se u njima zbog toga inducira trofazni sustav napona koji se preko tri klizna koluta i četkica priključuje na potrošnju. Upravo su ti klizni kontakti najveći problem jer ograničavaju snagu generatora i kompliciraju održavanje. Invertirani sinkroni generator je i danas vrlo interesantan ali samo kao sastavni dio samouzbudnog beskontaktnog sinkronog generatora.

59. SINKRONI GENERATOR S ČETKICAMA I NEZAVISNOM UZBUĐOM

Nezavisna uzbuđa generatora koristila se u doba dok još nije bilo diodnih ispravljača pa se istosmjerna struja za uzbuđu mogla dobiti samo iz istosmjernog generatora. Ujedno se regulacijom struje uzbuđe istosmjernog generatora vrlo jednostavno regulirala i struja uzbuđe, a time i napon sinkronog generatora. Isti pogonski stroj pogonio je dakle glavni (sinkroni) generator i mali istosmjerni samouzbudni generator (uzbudnik). Nedostatak ovog rješenja bio je u povećanom održavanju zbog istosmjernog generatora i njegovih četkica ali i četkica na sinkronom generatoru pa je napušteno kada su se ostvarili uvjeti za pouzdano i jednostavno ispravljanje izmjenične struje pomoću dioda.

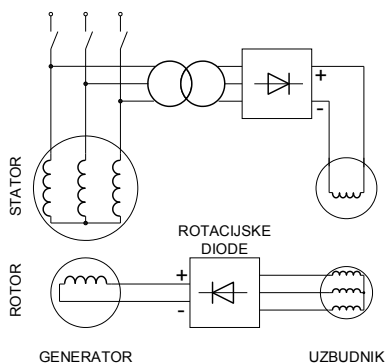


60. SAMOUZBUDNI SINKRONI GENERATOR S ČETKICAMA



Samouzbudni sinkroni generator sam proizvodi električnu energiju za svoju uzbudu. Generirani napon sinkronog generatora se ispravlja pomoću diodnog mosta i preko četkica i kliznih kolata dovodi na rotorski uzbudni namot. Početni napon kod pokretanja dobije se zahvaljujući remanentnom (zaostalom) magnetizmu u polovima rotora. Nedostatak ovog rješenja koje se i danas koristi na kopnenim centralama su klizni kolati i četkice, koji zahtijevaju održavanje odnosno povremene kontrole i zamjene. Na brodovima su se ovakvi generatori koristili prije nego što su diode postale dovoljno male, otporne na vibracije i pouzdane da se montiraju na rotor, što je učinjeno kasnije na beskontaktnim sinkronim samouzbudnim generatorima. Ukoliko se, najčešće zbog pogrešne konstrukcije i/ili dugog stajanja, izgubi remanentni magnetizam generator treba uzбудiti kratkotrajnim priključivanjem četiri u seriju spojene baterije izravno na četkice dok se generator vrti pazeći na polaritet. Struja koja poteče pojačati će magnetsko polje, pa će se na statoru inducirati veći napon koji će opet potjerati veću struju uzbude i tako pokrenuti proces samouzbuđe, koji traje nekoliko sekundi.

61. SAMOUZBUDNI BEZKONTAKTNI SINKRONI GENERATOR



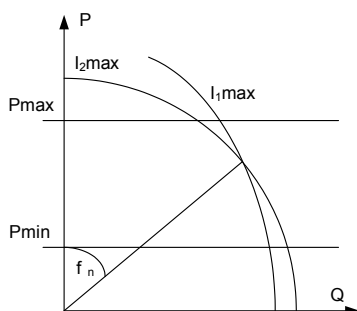
Danas se na nove brodove ugrađuju isključivo beskontaktni sinkroni samouzbudni generatori. Njihova je osnovna prednost što nemaju kliznih kontakata pa ne zahtijevaju veliku pažnju. Ovi se generatori sastoje od dva stroja priključena na istu osovinu: glavnog generatora klasične izvedbe (ali bez kliznih kolata) i invertiranog sinkronog generatora koji mu služi kao uzbudnik, odnosno osigurava struju uzbude. Kada pogonski stroj (dizel motor) vrti generator generirani napon sinkronog generatora, koji nastaje presijecanjem trofaznih vodiča statora magnetskim poljem rotora, ispravlja se pomoću diodnog mosta i dovodi na statorski uzbudni namot uzbudnika. Na vodičima trofaznog rotorskog namota uzbudnika, zbog presijecanja magnetskog polja statora (uzbude) inducira se, trofazni sustav napona koji se na samom rotoru ispravlja pomoću šest dioda ispravljača i najčešće kroz šuplju osovinu, ispod ležaja, dovodi na uzbudne namote glavnog generatora. Početni napon nakon pokretanja dobije se zahvaljujući remanentnom (zaostalom) magnetizmu u polovima rotora glavnog generatora i statora uzbudnika. Ako generator nakon pokretanja pomoćnog motora ne generira napon, moguće je da je izgubio remanentni magnetizam pa ga treba uzбудiti kratkotrajnim spajanjem 4 serijski spojene baterije (4x1,5V) na uzbudni (statorski) namot uzbudnika dok se generator vrti i tako pokrenuti proces samouzbuđe.

62. KOMPAUNDNI SINKRONI GENERATOR

Napon sinkronog generatora jako pada s opterećenjem, posebice kada je riječ o induktivnom teretu. Za to je najzaslužnija reakcija armature, koja slabi magnetski magnetski tok a time i inducirani napon. **Kompaundacija** je tehničko rješenje, koje se najprije koristilo kod istosmjernih generatora kako bi im se održalo približno konstantan napon kod različite veličine opterećenja, ali je tada problem bio mnogo jednostavniji obzirom da se njihova istosmjerna armaturna struja mogla direktno spojiti na serijski uzbudni namot i tako s porastom opterećenja pojačavati uzbudu. Kako kod istosmjerne struje nema faznog pomaka između struje i napona i postoji samo djelatno opterećenje bilo je moguće precizno podesiti jačinu serijske uzbude tako da održava približno konstantan napon u cijelom području rada, bez regulatora napona. Kod sinkronih generatora se kompaundacija izvodi tako da se izmjenična armaturna (statorska) struja najprije transformira pomoću kompaundnog transformatora (koji je u naravi strujni transformator), te prije ili nakon ispravljanja, kao dodatna struja I_{dod} zbraja sa strujom uzbude u praznom hodu I_{10} dobivenom kod samouzbudnih sinkronih generatora iz uzbudnog transformatora. Iako kod sinkronih generatora danas redovito koristimo regulatore napona, kompaundacija je na brodskim generatorima obvezatna iz tri razloga: 1) Omogućuje rad sinkronog generatora i u slučaju kvara na regulatoru napona, 2) smanjuje propad napona kod naglog opterećenja (uključivanje velikih asinkronih motora) jer djeluje mnogo brže od regulatora napona i 3) osigurava dovoljno veliku trajnu struju kratkog spoja za selektivnu prorađu zaštite od kratkog spoja.

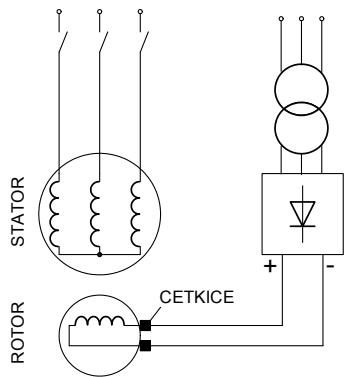
63. POGONSKI DIJAGRAM DIZEL-GENERATORA I NAZIVNI $\cos\phi$ SINKRONOG GENERATORA

Pogonski dijagram prikazuje dozvoljeno područje rada u P-Q (djelatna snaga – jalova snaga) koordinatnom sustavu. Nazivna snaga generatora je prividna snaga S koja obzirom da je napon konstantan ovisi o najvećoj dozvoljenoj statorskoj struji I_{2max} . Kako je



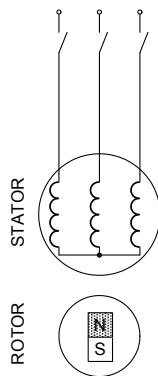
prema trokutu snage $S^2 = P^2 + Q^2$ ova granica predstavlja kružnicu sa središtem u ishodištu koordinatnog sustava. Drugo ograničenje je najveća dozvoljena struja rotora (uzbudna struja) I_1 . Naime svaki porast opterećenja (potrošnje) treba kompenzirati adekvatnim povećanjem uzbudne struje kako bi se zadržao nazivni napon generatora i mreže. Obzirom da u slučaju induktivnog opterećenja generatora napon generatora pada više nego kod djelatnog opterećenja potrebna je kod jakog induktivnog opterećenja značajno veća struja uzbude. Pri tome bi bilo nerazborito predimenzionirati uzbudni namot generatora tako da može zadržati nazivni napon i kod pune nazivne (prividne) snage u slučaju opterećenja s izuzetno niskim $\cos\phi$ koji bi bio niži od onoga predviđene potrošnje. Na brodu se zbog prevladavajućeg udjela asinkronih motora u potrošnji električne energije uobičajeno računa s $\cos\phi=0,8$. Nazivni $\cos\phi$ sinkronog generatora je dakle najniži faktor snage potrošnje kod kojeg generator još uvijek može razviti svoju nazivnu snagu ($S_n[kVA]$). Na pogonskom dijagramu je nazivni $\cos\phi$ označen kao presjecište kružnica I_{2max} i I_{1max} . Ograničenja po maksimalnoj P_{max} i minimalnoj P_{min} djelatnoj snazi odnose se na pogonski stroj (dizel-motor), koji ne može dati veću snagu od predviđene niti trajno raditi s malim opterećenjem.

64. SINKRONI MOTOR



Sinkroni generatori, kao uostalom i svi drugi rotacijski električni strojevi kada im se promijeni smjer toka energije, mogu raditi i u motorskom režimu rada. Sinkroni motor može dakle biti građen na isti način kao i sinkroni generator: Uzbudni namotaji smješteni su na rotoru i kroz njih teče istosmjerna struja koja stvara nepromjenljivo magnetsko polje što rotor čini elektromagnetom. Na starim sinkronim motorima se uzbudna struja prenosi na rotor preko četkica i dva klizna koluta. Na statorskoj strani, kroz trofazne prostorno pomaknute statorske namotaje priključene na trofazni sustav napona teku fazno pomaknute struje, pa su ispunjeni uvjeti za nastanak okretnog magnetskog polja. Rotor se, budući da je magnetiziran, poput kompasa, postavlja u smjeru silnica okretnog magnetskog polja statora što znači da se skupa s njime vrti sinkronom brzinom. Sinkroni se motor okreće sinkronom brzinom bez obzira na moment tereta dok je on manji od maksimalnog momenta kod kojeg dolazi do preskakanja polova, pa je i njegova momentna karakteristika vertikalni pravac kod sinkrone brzine. Kao i kod generatora, pri opterećenju motora se također javlja kut opterećenja δ , samo je kod motora pozitivan, što znači da okretno magnetsko polje vuče rotor.

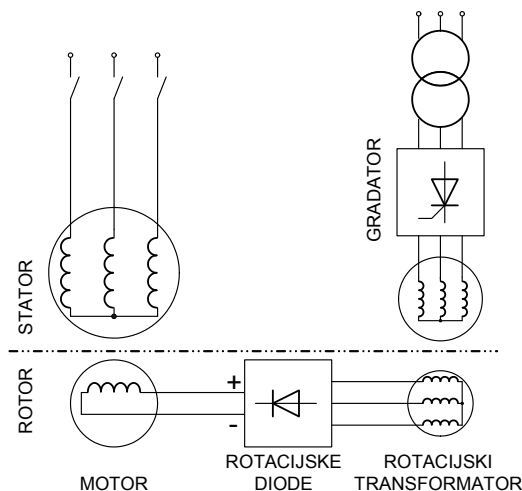
Za razliku od sinkronih generatora koji moraju imati uzbudne namote kako bi im se uzbudnom strujom moglo regulirati napon, najmodernije verzije sinkronih motora imaju na rotoru ugrađene izuzetno snažne permanentne magnete. Osnovna prednost izvedbe s



permanentnim magnetima je veća specifična snaga što omogućuje izradu motora manjeg promjera a to je posebno važno za podtrupne porivnike (AZIPODE) jer povećava njihovu hidrodinamičku efikasnost. Druga im je prednost da nemaju uzbudni sklop ni klizne kontakte (klizne prstene i četkice) što oslobađa brodski prostor, značajno povećava pouzdanost motora i pojednostavljuje održavanje. Sinkroni motori s permanentnim magnetima su mnogo skuplji od motora s uzbudnim namotima jer je cijena kvalitetnih permanentnih magneta vrlo visoka.

Treća vrsta sinkronih motora su beskontaktni motori koji su samo naizgled slični beskontaktnim sinkronim samouzbudnim generatorima. Umjesto klasičnog uzbudnika kao kod sinkronih samouzbudnih bezkontaktnih generatora motori imaju tzv. rotacijski transformator (ROTATING TRANSFORMER) koji je po svojoj konstrukciji vrlo sličan asinkronom kolutnom motoru. Iako bezkontaktni

sinkroni generator može preći u motorski rad (kojom prilikom mu na brodu proradi zaštita od povratne snage), što se i koristi kod npr. reverzibilnih hidroelektrana (turbina noću pumpa vodu nazad u jezero) on se općenito ne može koristiti kao motor iz jednostavnog razloga što se ne može pokrenuti jer njegov uzbudnik (invertirani sinkroni generator), dok stoji, ne može inducirati napon na trofaznim rotorskim namotima. Rotacijski transformator se napaja iz nezavisnog trofaznog izmjeničnog izvora preko GRADATORA. Gradator je tiristorski uređaj, građen na isti način kao tiristorski uputnik, a ima na svakoj fazi dva antiparalelno spojena tiristora koji promjenom kuta vođenja reguliraju napon. Pri spajanju na statorske namote rotacijskog transformatora, odabran je redosljed faza koji daje okretno magnetsko polje suprotnog smjera od okretnog magnetskog polja sinkronog motora. U suprotnom, kada bi se smjerovi okretnih magnetskih polja podudarali, nakon zaleta motora do sinkrone brzine u rotoru rotacijskog transformatora više ne bi bilo induciranja napona jer bi se vrtio istom brzinom kao i magnetsko polje statora. Ovako, s promjenjenim smjerom okretnog magnetskog polja, rotacijski transformator kreće s klizanjem $s=1$, da bi se na kraju zaleta sinkronog motora klizanje popelo na $s=2$. Veliko klizanje u ovom slučaju ne utječe na gubitke (kao kod asinkronog motora) jer rotacijski transformator nema kratko spojeni rotor već predaje električnu energiju na njega spojenoj uzbudi sinkronog motora.

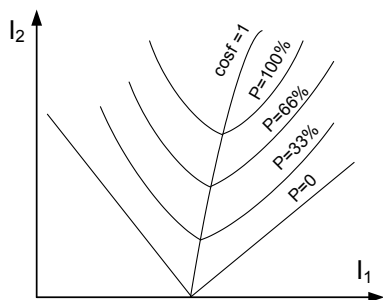


65. UPUĆIVANJE SINKRONIH MOTORA

Pored njegove više cijene i osjetljivije konstrukcije rotora, glavni nedostatak sinkronih motora je bio problematičan zalet. Zbog inercije rotora, sinkronom motoru sve dok ne postigne sinkronu brzinu stalno pucaju silnice i rotor gubi vezu s okretnim magnetskim poljem odnosno „preskače“ što je povezano s pojavom velike struje. Stoga se samo izuzetno mali sinkroni motori mogu se upućivati direktnim spojem na mrežu. Klasični način upućivanja je asinkroni zalet pomoću prigušnog kaveza uz primjenu istih uputnika koji se koriste kod pokretanja asinkronih motora. Uzbudni namot se prije zaleta spoji na zaletni otpornik kako se tijekom zaleta ne bi u njemu inducirao preveliki napon koji bi mu mogao oštetiti izolaciju. Trofazni statorski namoti se zatim spajaju na mrežu direktno ili pomoću jednog od indirektnih uputnika (zvijezda-trokut, autotransformator, prigušnica, tiristorski uputnik). Kada motor postigne stacionarnu brzinu (još uvijek manju od sinkrone), uzbudni se namotaj odspoji s otpornika i priključi na istosmjerni izvor napona. Pri tome motor uskoči u sinkronizam i nastavi se okretati sinkronom brzinom. Drugi klasični način upućivanja, koji se na brodu koristi za zalet sinkronog kompenzatora (koristi se uz osovinski generator s pretvaračem frekvencije) je pasivni start pomoću malog nezavisnog asinkronog motora (PONY MOTOR). Danas se međutim sinkroni motori uglavnom koriste u sklopu reguliranih elektromotornih pogona što znači da su napajani iz pretvarača frekvencije koji ih ujedno na najbolji mogući način i upućuju polako podižući frekvenciju i napon uz kontrolu položaja rotora.

66. V-KRIVULJE SINKRONOG MOTORA

Regulacija uzbudne struje ipak može ponekad biti i korisna kada se želi podešavati faktor snage ($\cos\phi$) s kojim će motor raditi kako se to može vidjeti na V-krivuljama sinkronog motora koje prikazuju ovisnost statorske struje o uzbudnoj struji uz konstantne



vrijednosti opterećenja. Opterećenje je kod sinkronog motora mehanička snaga predana osovini. Iz V-krivulja je vidljivo da se promjenom uzbudne struje može podesiti da sinkroni motor radi s faktorom snage 1 ($\cos\varphi=1$) pri čemu je staterska struja koju uzima iz mreže minimalna, pa su prema tome minimalni i gubici u bakru kako motora tako i kabela i generatora koji ga napaja. Kod manje uzbudne struje sinkroni motor radi u poduzbuđenom području tj. ponaša se kao induktivni teret, a kod veće struje uzbude u preuzbuđenom području gdje se ponaša kao kapacitivni teret i pomaže generatoru u snabdijevanju potrošnje jalovom snagom. Sinkroni kompenzator je sinkroni motor kojemu je osovina slobodna (nema priključenog tereta), pa radi s karakteristikom $P=0$ u preuzbuđenom području (desno od $\cos\varphi=1$)

67. AKUMULATORSKE BATERIJE

Sastav i način rada: Akumulatori su reverzibilni izvori električne energije. Energija se dovodi iz brodske mreže preko punjača i skladišti zahvaljujući kemijskom procesu. Kod punjenja se električna energija pretvara u kemijsku energiju a kod pražnjenja obrnuto. Kapacitet akumulatorske baterije izražava se u Ah. Baterija od 100Ah može teoretski davati struju od 10 A kroz 10 sati. U stvarnosti se može dobiti pola nazivne energije. Nazivni napon baterije ovisi o broju članaka. Prema vrsti kemijskog procesa razlikujemo olovne akumulatora i čelične akumulatora.

Punjenje i pražnjenje akumulatora: Akumulatori se pune iz punjača. Napon punjenja olovni akumulatora standardno iznosi 2,4V po članku, ali suvremeni punjači mijenjaju napon punjenja u skladu s stupnjem napunjenosti akumulatora i temperaturom kućišta. Tako se ubrzava vrijeme punjenja, produljuje životni vijek i smanjuje obim održavanja (manji gubitak vode). Temperatura elektrolita pri punjenju ne smije preći 45°C. Baterije se pune dok je brodska mreža pod naponom, da bi se praznile napajajući priključene potrošače kada nestane napona mreže.

Olovni akumulatori imaju olovne elektrode. Pozitivna elektroda je olovni dioksid PbO_2 , dok je negativna elektroda čisto olovo Pb. Elektrode su smještene u kućište od izolacijskog materijala napunjeno razrijeđenom sumpornom kiselinom H_2SO_4 koja služi kao elektrolit. Pri pražnjenju stvara se na obim elektrodama olovni sulfat $PbSO_4$ koji se kod punjenja ponovno razgrađuje. Nazivni napon jednog članka je 2V. Napon punjenja je oko 2,4V. Najniži napon pražnjenja je oko 1,73 V. Gustoća sumporne kiseline kod punog akumulatora je 1,27 - 1,285 kg/l. Kod pražnjenja gustoća elektrolita pada. Stupanj napunjenosti pojedinog članka može se odrediti mjerenjem gustoće kiseline pomoću higrometra (bometra).

Alkalijski akumulatori (čelični, NiCd) Pozitivna elektroda sadrži nikal-3-hidroksid $Ni(OH)_3$, a negativna kadmij Cd. Elektrolit je kalijeva lužina KOH. Kod pražnjenja pozitivna elektroda reducira u nikal-2-hidroksid $Ni(OH)_2$, a negativna elektroda oksidira u kadmijev hidroksid $Cd(OH)_2$. Kućište je od čelika. Nazivni napon jednog članka je 1,2V. Napon punjenja je 1,55V. Najniži napon pražnjenja 1,1V. Gustoća elektrolita novog akumulatora je 1,19 kg/l i polako pada sa starenjem akumulatora. Kada padne ispod 1,145 treba kompletno promijeniti elektrolit ili zamijeniti bateriju. Stupanj napunjenosti članka ne može se odrediti mjerenjem gustoće elektrolita. Alkalijski akumulatori su skuplji ali mehanički i električki izdržljiviji od olovni. Imaju dulji životni vijek, mogu dugo stajati napunjeni bez potrebe za punjenjem.

Održavanje akumulatora:

- Obavezno je koristiti zaštitnu opremu: naočale, gumene rukavice i radno odijelo.
- Provjera gustoće elektrolita i dolijevanje destilirane vode.
- Gornja površina mora se održavati čistom i suhom.
- Provjeravanje zategnutosti klem i premazivanje klem vazelinom da se spriječi oksidacija kontakata.
- Zamjena neispravnih baterija.

Smještaj akumulatora: Akumulatori se smještaju u akumulatorsku stanicu koja mora biti dobro ventilirana kako bi eksplozivni plinovi koji se stvaraju tijekom punjenja (vodik), mogli nesmetano izaći. Akumulatorska stanica spada u opasne prostore. Police na koje se smještaju moraju biti zaštićene odgovarajućom bojom otpornom na elektrolit. Akumulatori moraju biti tako smješteni da se omogući njihovo lako povezivanje (što kraće i ravnije spojnice) i smanji na minimum mogućnost nastanka kratkog spoja. Punjač akumulatora i pripadajuća električna oprema ne smije biti u istoj prostoriji s akumulatorima. Alkalijski i olovni akumulatori ne smiju biti u istoj prostoriji.

Provjera ispravnosti akumulatora vrši se na tri načina:

1. Provjera napona pri opterećenju je najpouzdaniji način ispitivanja akumulatora. Pojedina ćelija ili cijela baterija spajaju se na vilicu sa paralelno spojenim snažnim žičanim ili limenim otpornikom vrlo malog otpora i voltmetrom pri čemu poteče velika struja koja odgovara snazi baterije (cca 100A). Pokazivanje voltmetra mora ostati unutar normalnih granica (zeleno područje).
2. Provjera gustoće elektrolita može se vršiti u radnom stanju. U bometar se pomoću vakuumske pumpice usiše dio kiseline iz ćelije. Ako je gustoća unutar zadanih granica ćelija je vjerojatno ispravna.
3. Provjera napona cijelog seta baterija je najmanje pouzdana ali i najjednostavnija metoda. Treba isključiti napajanje s mreže i tada mjeriti napon baterije koja u tom trenutku napaja priključenu potrošnju. Napon mora biti barem 2V po članku (2-2,1V) što znači da mora imati barem nominalni napon istosmjerne mreže koju napaja (24,110 ili 220V). Problem je što cijeli set baterija najčešće obuhvaća veći broj paralelno i serijski spojenih baterija. Paralelno spojene baterije ne mogu se pojedinačno ispitati bez odspajanja.

Primjena akumulatora: Akumulatori se koriste kao rezervni izvori energije za napajanje strujnih krugova koji moraju raditi i tijekom blackouta kao što su: dio rasvjete, komunikacije, alarmni sustav, automatika... Akumulatori se pune iz punjača dok je mreža pod naponom, a automatski preuzimaju napajanje u blackoutu. Također akumulatori se nekad koriste za startanje dizelmotora generatora za nuždu, a ponekad i manjih pomoćnih motora.

Ukoliko na brodu nema dizel-generatora već se kao izvor energije za nužnost koriste **akumulatorske baterije** one **imaju ograničeni kapacitet**, pa je prema tome i vrijeme u kojem se mogu koristiti bez nadopunjavanja ograničeno i ovisi o priključenju potrošnji.

Ukoliko se zbog velikog kvara očekuje da će blackout potrajati dulje treba **maksimalno smanjiti potrošnju** odnosno isključiti sva nepotrebna trošila. Najmanje **vrijeme u kojem baterije moraju napajati zadanu potrošnju određeno je pravilima registra i ovisi o području plovidbe i veličini i vrsti broda i kreće se od 3 do 18 sati**.

Ako se akumulatorske baterije koriste samo kao kratkotrajni izvor energije za napajanje u nužnosti (kada dakle postoji generator za nužnost), moraju najmanje 30 minuta osigurati napajanje pomoćne rasvjete, komunikacije i signalizacije.

3. KOLOKVIJ

ENERGETSKA ELEKTRONIKA

68. POLUVODIČKI VENTILI

Poluvodički ventili su elektronički elementi napravljeni na bazi silicija koji se u energetskej elektronici koriste za uključivanje i isključivanje protoka struje u strujnim krugovima. To znači da elektronički ventili u osnovi imaju dva stanja: uključeno (struja teče) i isključeno (struja ne teče). Prema upravljivosti se dijele na: neupravljive, poluupravljive i punoupravljive. Neupravljivi ventil (dioda) nema upravljačke elektrode pa stoga ni mogućnosti upravljanja, a djeluje kao nepovratni ventil jer vodi struju samo u jednom smjeru.. Poluupravljivi ventili su tiristor i triac koje se u željenom trenutku može pomoću upravljačke elektrode uključiti, ali je samostalna kontrola isključivanja nemoguća već se gase sami kad im struja padne ispod neke minimalne vrijednosti (struje držanja).

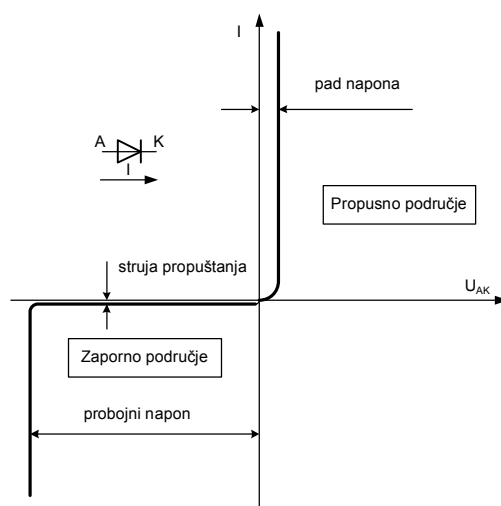
Danas se najveća pažnja posvećuje razvoju i primjeni punoupravljivih ventila, kao što su: MOSFET, tranzistor i GTO tiristor te njihovi hibridi: IGBT i IGCT koji se najviše i koriste u najmodernijim pretvaračima frekvencije. Punoupravljivi ventili se mogu po želji uključivati i isključivati

69. GUBICI U VENTILIMA

Na svakom poluvodičkom ventilu kada kroz njega teče struja javlja se pad napona koji kada je ventil u uključenom stanju gotovo da ne ovisi o veličini struje. Padovi napona na elektroničkim ventilima su izrazito mali i zanemarivi su u odnosu na izlazni napon uređaja koji ih koristi, ali ne i kada je riječ o gubicima. Gubici na elektroničkim ventilima dijele se na gubitke vođenja i gubitke prekapčanja. Gubici vođenja javljaju se samo u uključenom stanju (dok kroz ventil teče struja), a računaju se kao umnožak struje i pada napona na ventilu $P_v = IU$. Grafički, oni odgovaraju površini pravokutnika određenog apscisom, ordinatom i radnom točkom na vanjskoj karakteristici (U-I) ventila. Gubici prekapčanja se javljaju kod svakog prelaska iz isključenog stanja u uključeno i obratno. Ovisi o frekvenciji prekapčanja i njegovom trajanju koje opet ovisi o induktivitetu tereta. Kako elektronički ventili često rade s velikom frekvencijom prekapčanja, gubici prekapčanja mogu biti vrlo veliki. Iako je kod velikih pretvarača frekvencije riječ o desecima kilovata, uređaji energetske elektronike ipak imaju izuzetno visok stupanj korisnosti (0,99). Gubici u ventilima nisu stoga toliko značajni zbog stupnja korisnosti koliko zbog problema odvođenja tolike toplinske energije s ventila, odnosno jednostavnije rečeno njegovog hlađenja. Veliki dio prostora što ga zauzima uređaj energetske elektronike otpada upravo na sustav hlađenja. Elektronički ventili imaju izuzetno malu masu i stoga mali toplinski kapacitet, tako da je dovoljno i kratkotrajno preopterećenje da se pregrije i izgore. Za hlađenje se najviše koriste aluminijski hladnjaci kroz čija rebra struji zrak a kod velikih snaga se koristi i vodeno hlađenje. Izuzetno je važno da se kod montaže ventil premaže specijalnom termički vodljivom pastom i čvrsto stisne na hladnjak kako bi prijelaz topline bio što efikasniji. Ako zakaže prisilni sustav hlađenja (ventilator, pumpa) uređaj se automatski trenutno isključuje.

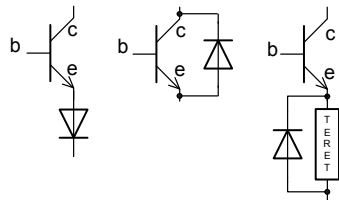
70. DIODA

Dioda vodi struju samo u jednom smjeru pa prema tome ispravlja struju (ne nužno i napon). Analogna je nepovratnom ventilu u hidraulici. 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. U ispravljačima se koriste diode predviđene za rad na 60Hz (Rectifier grade), dok su za prekidačke izvore (choppere) i izmjenjivače (invertere) potrebni brži ventili (Inverter grade). Dioda ima samo dva priključka ANODU (+) i KATODU (-). Trokutić u njenom simbolu pokazuje propusni smjer struje. Ispravnost energetske diode provjerava se kod malih napona ommetrom a kod većih (>400V) induktorom. Dioda se najprije mora odpojit (barem jedna strana) kako se strujni krug ne bi zatvarao kroz druge elemente u uređaju što bi dalo pogrešne rezultate mjerenja. Moguća su tri kvara diode: Kratki spoj, prekid i probijanje. U slučaju kratkog spoja instrument pokazuje mali otpor u oba smjera (+ na Anodi, - na Katodi i obratno). Kod prekida instrument pokazuje veliki otpor u oba smjera, a kod probijanja se otpor u nepropusnom smjeru (- na Anodi, + na Katodi) naglo mijenja između male i velike vrijednosti, dok u propusnom smjeru instrument pokazuje mali otpor.



71. TRANZISTOR

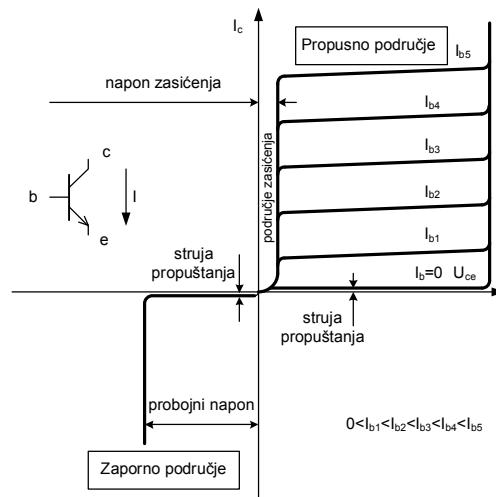
Tranzistor je punouprtljivi ventil, koji vodi samo u jednom smjeru, a kojemu se podešavanjem struje baze može regulirati struja koja kroz njega prolazi (struja kolektora I_c odnosno emitera I_e). Iako je, dakle, tranzistor u svojoj osnovi pojačalo koje jednostavno multiplicira baznu struju, u energetskej se elektronici isključivo koristi kao sklopka odnosno ventil. To znači da je tijekom rada 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. 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 je za energetske tranzistore između 15 i 100. Zbog takvog relativno malog pojačanja tranzistor zahtijeva snažne impulse na bazi, a prema tome i snažne upravljačke sklopove. U energetskej se 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 (perioda). 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 samostalno koristiti kao ispravljač, a često ga treba i zaštititi od reverznog napona (krivi polaritet) koji bi ga trenutno uništio. Tri su moguća načina: serijski spojena dioda, antiparalelno spojena dioda a nuldioda (spojena antiparalelno teretu).

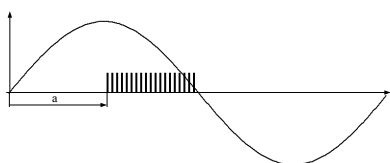
Energetski tranzistor se više ne koristi u energetskej elektronici (osim kod sasvim malih snaga). Zamijenio ga je IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). To je punouprtljivi ventil novije generacije, nastao integracijom tranzistora i MOSFET-a koji mu daje struju baze. Karakteristike su mu iste kao 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 (veliki otpor između anode i katode u oba smjera) pa je moguće paralelno spajanje zbog redundancije. IGBT se godinama uspješno koristio u pretvaračima frekvencije manjih snaga.



72. TIRISTOR

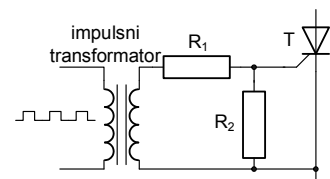
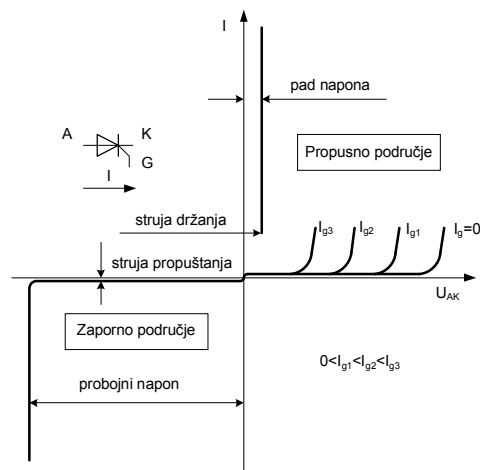
Tiristor je poluuprtljivi elektronički ventil koji vodi samo u jednom smjeru, a kojeg se pod uvjetom da je propusno polariziran (+ na anodi, - na katodi) može uključiti slabim kratkotrajnim pozitivnim (u odnosu na katodu) impulsom na upravljačkoj elektrodi koja se naziva **gate**. Kada je jednom proveo tiristor se ne može po želji ugastiti, 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. U protivnom bi i bez upravljačkog impulsa ponovno proveo. Oporavljanje je brže dok je tiristor reverzno polariziran. Tiristor može provesti bez upravljačkog impulsa i ako je izložen nagloj promjeni napona dU_{AK}/dt što se događa kod pojave prenapona u mreži. Tiristor je osjetljiv na nagli porast struje prilikom ukapčanja di/dt što mu jako povećava gubitke. Tiristor ima jednaki probojni napon u propusnom i reverznom smjeru što ga čini idealnim za primjenu u upravljivim (tiristorskim) 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 (kod visokonaponskih može biti i veći od 3V). Tiristor zbog duljeg vremena oporavljanja radi na mnogo nižim frekvencijama prekapčanja od tranzistora, ali zato treba mnogo slabije upravljačke sklopove i bolje podnosi preopterećenje. Tiristori se i danas koriste u mrežno komutiranim pretvaračima frekvencije (sinkrokonverter i ciklokonverter) najvećih snaga.

Okidni sklop za upravljanje tiristorima prikazan je na slici. 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 (mosni ispravljači) 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 po jedan). Kod mrežno komutiranih ispravljača daje se niz impulsa počevši od trenutka kada tiristor treba provesti pa sve dok ne postane reverzno polariziran. Tiristor će u pravilu provesti kod prvog impulsa.

GTO (Gate Turn Off) tiristor je punouprtljivi ventil koji se, poput tiristora, uključuje 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. 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.

GTO se više ne koristi u energetske elektronici. Zamijenio ga je **IGCT** (Integrated Gate Commutating Thyristor). To je punoupravljivi integrirani elektronički ventil zasnovan na GTO tiristoru. Ima sve prednosti GTO tiristora: veliku struju i napon te niske gubitke vođenja, ali ga odlikuje i relativno visoka frekvencija prekapčanja. Kod kvara IGCT u pravilu ostaje u kratkom spoju (mali otpor između anode i katode u oba smjera), pa se kod velikih snaga se kao i kod tiristora koriste serijski spojevi više jednakih ventila.

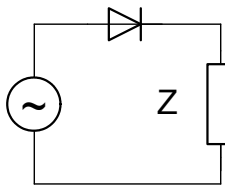
ISPRAVLJAČI

73. PULSNI BROJ I PODJELA ISPRAVLJAČA

Ispravljači (RECTIFIER) su uređaji energetske elektronike koji pretvaraju izmjeničnu struju u istosmjernu. Prema tome da li ispravljaju jednofaznu ili trofaznu struju dijele se na jednofazne i trofazne. Trofazni ispravljači imaju veći pulsni broj. **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. Prema vrsti ventila koje koriste ispravljači se dijele na: **neupravljive, poluupravljive i punoupravljive**. Neupravljivi su sastavljeni samo 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 samo od tiristora. Prema načinu rada ispravljači se dijele na **aktivne i pasivne**. Kod pasivnih ispravljača ventili (dioda i tiristori) su mrežno komutirani i stoga se gase pojavom reverznog napona na ventilu kao posljedicom promjena (sinusoide) 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 kočenja motora kojim upravljaju.

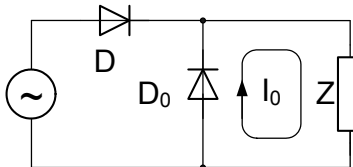
74. JEDNOFAZNI POLUVALNI NEUPRAVLJIVI ISPRAVLJAČ

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. Teret koji je preko diode spojen na izvor i ima dakle isti - negativni napon. Tok energije je od tereta prema izvoru. U ispravljenom naponu (na teretu) javljaju se dakle i negativni dijelovi.



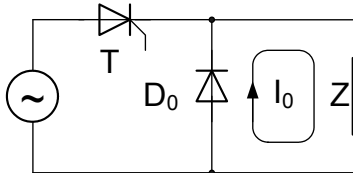
75. KOMUTACIJSKA DIODA (NULDIODA)

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.



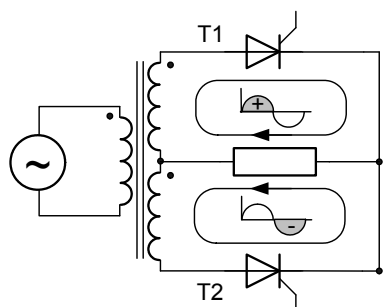
76. JEDNOFAZNI POLUVALNI UPRAVLJIVI ISPRAVLJAČ S NUL-DIODOM

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 nuldiode 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.



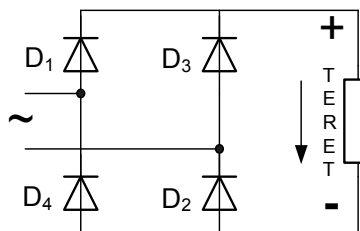
77. PUNOVALNI ISPRAVLJAČ U SPOJU SA SREDNJOM TOČKOM

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)

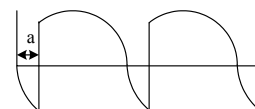
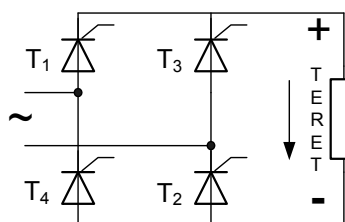
78. JEDNOFAZNI MOSNI DIODNI ISPRAVLJAČ (GRETZOV SPOJ)



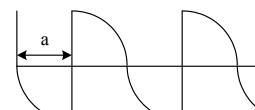
Gretzov spoj je najrašireniji ispravljač. To je također punovalni ispravljač pa ima isti oblik ispravljenog napona. Tijekom pozitivne poluperiode izmjeničnog napona struja teče kroz diodu D1-TERET-diodu D2, a tijekom negativne poluperiode kroz diodu D3 – TERET – D4. Struja kroz teret dakle teče uvijek 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. Struja kratkog spoja ograničena je impedancijom transformatora iz kojeg se diodni most napaja.

79. JEDNOFAZNI MOSNI TIRISTORSKI ISPRAVLJAČ

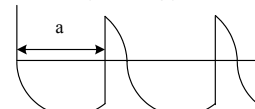
Zamijene li se diode u Gretzovom spoju tiristorima dobije se punoupravljivi jednofazni ispravljač. Tijekom pozitivne poluperiode vode tiristori T_1 i T_2 a tijekom negativne tiristori T_3 i T_4 . Spomenuti parovi tiristora moraju impulse dobivati istovremeno. Kod vrlo induktivnog tereta pri prelasku iz pozitivne u negativnu poluperiodu tiristori T_1 i T_2 vode sve dok se ne uključe tiristori T_3 i T_4 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. Izmjenična struja koju sklop uzima iz mreže je kod induktivnog tereta pravokutnog oblika. Ovaj ispravljač je dvosmjernan. 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). Maksimalna vrijednost ispravljenog napona je kao i kod diodnog mosta $U_{SR}=0,9 U_{\sim}$.



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

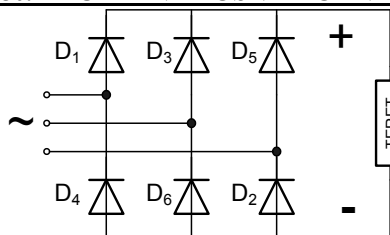


Bez izmjene energije $\alpha = 90^\circ$

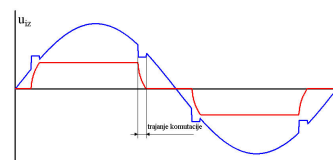


Izmjenjivački režim rada $\alpha > 90^\circ$

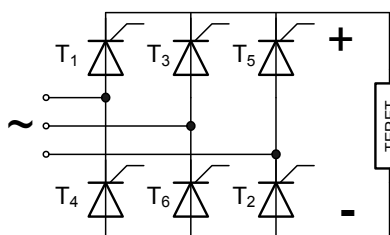
80. TROFAZNI MOSNI DIODNI (NEUPRAVLJIVI) ISPRAVLJAČ



Ovo je punovalni 6-pulsni ispravljač koji na izlazu daje vrlo kvalitetan napon relativno male valovitosti. Na brodu se koristi za uzbudu sinkronih generatora (na rotoru i na statoru), za punjenje akumulatora, i za katodnu zaštitu. Sastavni je dio starijih izvedbi ŠIM pretvarača frekvencije. 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. Već uz sasvim malu vrijednost induktiviteta na teretu dobije se kvalitetna istosmjerna struja. Struja koju uzima iz mreže je pravokutnog oblika, a na mrežnom naponu izaziva karakteristične propade napona. Faktor snage $\cos \varphi = 1$ bez obzira na vrstu tereta.

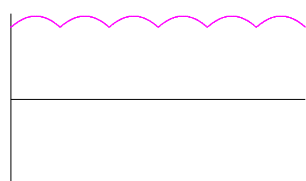


81. TROFAZNI MOSNI TIRISTORSKI ISPRAVLJAČ

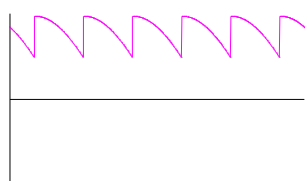


Ovo je 6-pulsni punovalni punoupravljivi ispravljač koji je dvosmjernan pa može raditi i u izmjenjivačkom režimu (kada je $\alpha > 90^\circ$). Kod $\alpha = 90^\circ$ nema izmjene energije između mreže i tereta. Maksimalna vrijednost ispravljenog napona (kod $\alpha = 0^\circ$) je kao i kod diodnog mosta $U_{SR}=1,35 U_{\sim}$. 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. Koristi se za regulaciju napona i struje istosmjernih motora, ali i kao sastavni dio mrežno komutiranih pretvarača frekvencije: ciklokonvertera i sinkrokonvertera. Struja koju uzima iz mreže je istog oblika kao i kod diodnog 6-pulsnog mosta, samo se fazno pomiče u odnosu na napon mreže za kut vođenja α . Faktor snage stoga ovisi o kutu vođenja: $\cos \varphi = \cos \alpha$. Zbog toga

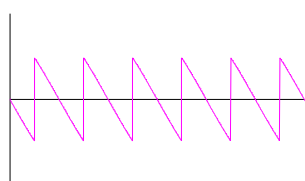
tiristorski most kao i svi pretvarači frekvencije koji ga koriste na mrežnoj strani (kao ispravljač) imaju izuzetno nizak $\cos \varphi$ kod malih opterećenja. Komutacijski kratki spojevi i propadi napona smanjuju se povećanjem u_k transformatora ili spajanjem na mrežu preko prigušnice. Ako se donji red tiristora zamijeni diodama dobije se poluupravljivi mosni ispravljač slabijih karakteristika.



$\alpha = 0^\circ$



$\alpha = 30^\circ$



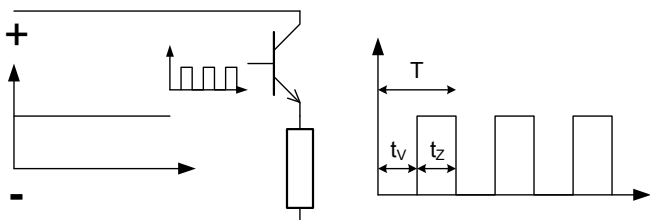
$\alpha = 90^\circ$



$\alpha = 150^\circ$

82. ČOPERI

Čoperi (CHOPPER) su DC/DC pretvarači odnosno regulatori istosmjernog napona (struje) koji uključivanjem i isključivanjem elektroničkih ventila sjećaju 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 , 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. Danas se čoperi rade isključivo sa punoupgradljivim ventilima.

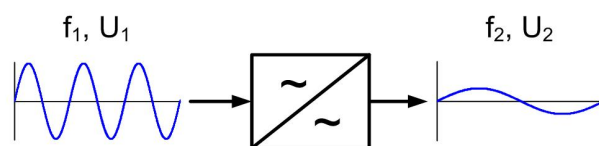
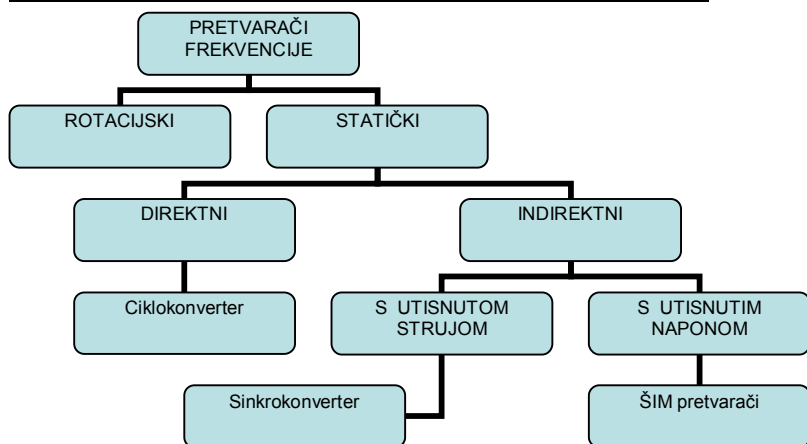
IZMJENJIVAČI

83. IZMJENJIVAČI

Izmjenjivači (INVERTER) su uređaji energetske elektronike koji pretvaraju istosmjernu električnu energiju u izmjeničnu, dakle DC/AC pretvarači. 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. Izmjenjivači se rijetko koriste samostalno (kao kod npr. UPS - besprekidno napajanje izmjeničnom strujom iz akumulatorskih baterija) a mnogo češće kao sastavni dio pretvarača frekvencije u kombinaciji s ispravljačima. Mali ŠIM pretvarači frekvencije s diodnim ispravljačem vrlo se često u praksi pogrešno nazivaju inverterima.

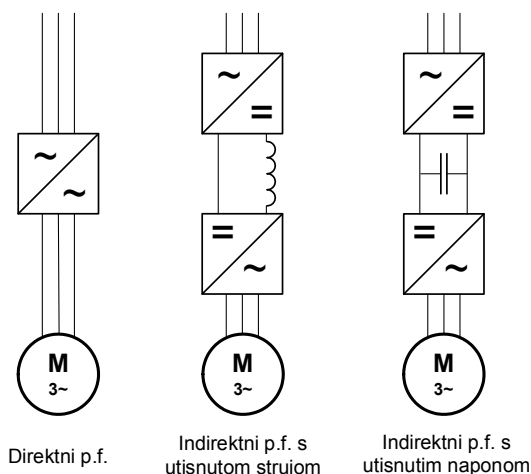
PRETVARAČI FREKVENCIJE

84. DEFINICIJA I VRSTE PRETVARAČA FREKVENCIJE

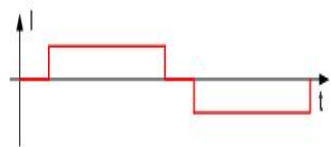
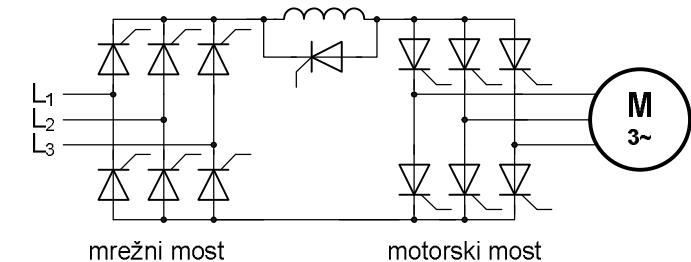


Rotacijski pretvarači frekvencije se više ne koriste a sastojali su se od sinkronog generatora pogonjenog motorom sa ili bez mogućnosti regulacije brzine, pa su uz različiti broj polova generatora i motora ili regulacijom broja okretaja davali na izlazu napon različite vrijednosti i frekvencije od onog na ulazu. **Statički pretvarači frekvencije** (FREQUENCY CONVERTER) 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-impulsno modulirani (ŠIM) pretvarač** frekvencije, a direktnih pretvarača frekvencije **ciklokonverter**.



85. SINKROKONVERTER



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.

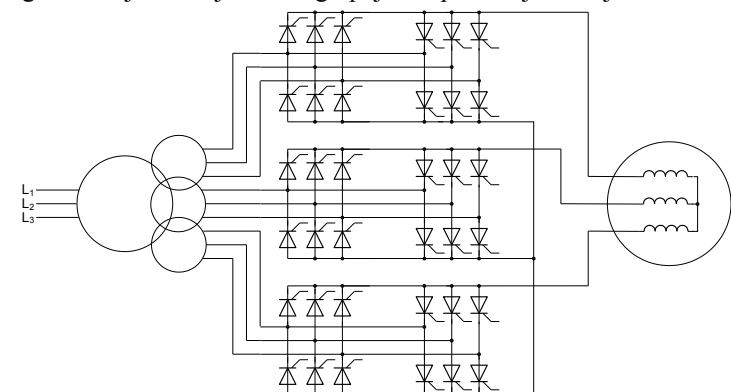
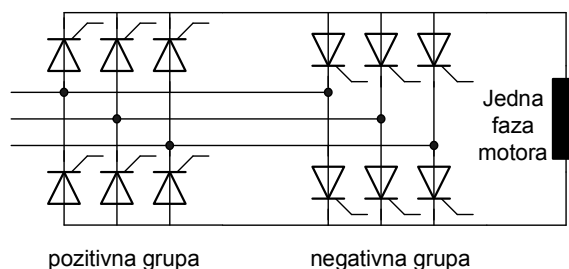
Sinkrokonverter spada u indirektno pretvarače frekvencije s utisnutom strujom pa je struja u istosmjernom međukrugu zahvaljujući velikom induktivitetu prigušnice praktički konstantna. Mrežni i tiristorski most tu struju sukladno željenoj frekvenciji i smjeru vrtnje prema predviđenom redoslijedu okidanja 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.

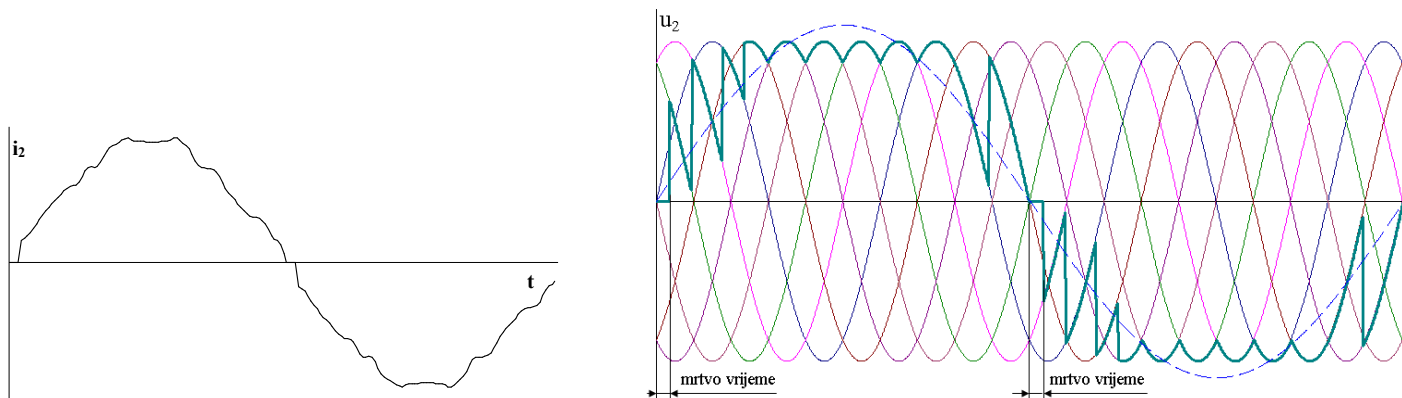
Kod pokretanja i pri malim brzinama (do 10% nazivne brzina) priključenog sinkronog motora induciranog napona na njemu nema ili je premali da bi omogućio mrežnu komutaciju tiristora motorskog mosta. U takvim uvjetima sinkrokonverter mora s normalnog sinkronog režima rada preći na **pulsni režim rada** 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 ugase, pa se može ponovno uključiti mrežni most i sljedeća dva tiristora motorskog mosta.

Sinkrokonverteri se na brodu koriste kao pretvarači frekvencije kod osoviniskog 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.

86. CIKLOKONVERTER

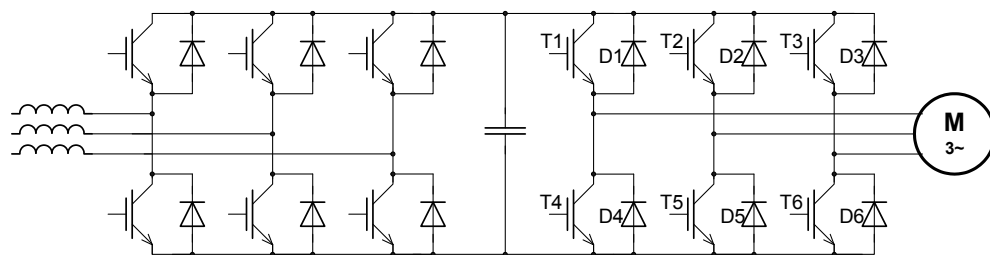
Ciklokonverter je direktni pretvarač frekvencije koji izlazni napon gradi iz segmenata ulaznog napona. Trofazni ciklokonverter ima tri grane. Svaka grana napaja jednu fazu a sastavljena je od po dva antiparalelno spojena tiristorska ispravljačka mosta koji se nazivaju **pozitivna i negativna grupa**. 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 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 ugasi 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 pa se niti ne koriste.



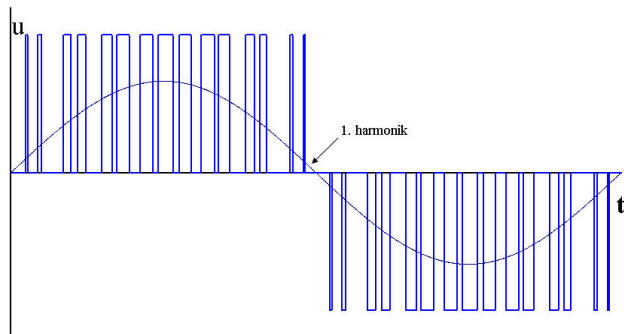


Struja i napon motora napajanog iz ciklokonvertera

87. ŠIRINSKO-IMPULSNO MODULIRANI (ŠIM) PRETVARAČI FREKVENCIJE

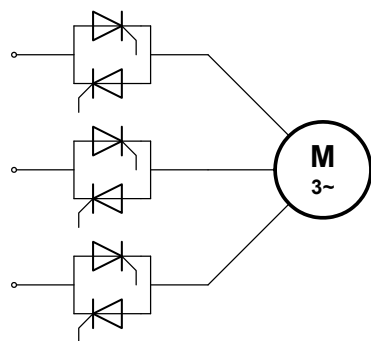


oba smjera), dok aktivni ispravljač daje mogućnost punog četverokvadrantnog rada. Izmjenjivač je uvijek izveden s punoupravljivim elektroničkim ventilima, danas uglavnom IGCT ili IGBT. Oni sjeckaju istosmjerni napon kako bi se na izlazu dobila približno sinusoidalna struja. Punoupravljivi ventili se 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 $\cos\varphi=1$ (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, veći gubici. ŠIM pretvarači s aktivnim ispravljačem (na slici) uzimaju gotovo sinusoidalnu struju iz mreže. Danas se ŠIM pretvarači masovno koriste kod svih reguliranih elektromotornih pogona od najmanjih do najvećih snaga.



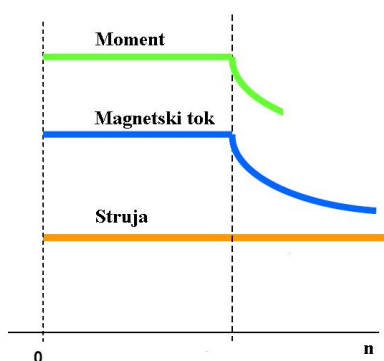
ŠIM (PWM-Puls With Modulated) pretvarači frekvencije su indirektni pretvarači frekvencije s utisnutim naponom. Konstantan napon u istosmjernom međukrugu osigurava veliki kondenzator. Ispravljač može biti aktivni (slika) ili diodni. Diodni ispravljač omogućuje samo dvokvadrantni pogon (motorski rad u

88. TIRISTORSKI UPUTNIK



Tiristorski uputnik (Soft starter) ima tri para antiparalelno spojenih tiristora koji napajaju tri faze motora. Umjesto punog sinusoidalnog napona asinkroni 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 $\alpha=0$). Na taj se način motor pokreće s kontroliranom strujom i bez trzaja. Tiristorski uputnik se ne koristi za regulaciju brzine asinkronih elektromotora jer su gubici u motoru zbog velikog klizanja neprihvatljivo visoki.

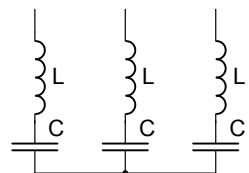
89. UPRAVLJANJE IZMJENIČNIM MOTORIMA POMOĆU PRETVARAČA FREKVENCIJE



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 (automatski). Nedostatak su povećani gubici u željezu zbog nesinusoidalnog napona te povećani gubici u bakru zbog nesinusoidalne struja. Javljaju se također povećane vibracije i buka. Ukoliko se vibracije poklope s vlastitom frekvencijom motora dolazi do naizgled neobjašnjivog pucanja osovine.

90. HARMONIČKI FILTRI

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 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, korištenje aktivnih ispravljača, povećanje rasipne reaktancije transformatora pretvarača frekvencije, smanjenje početne reaktancije generatora, ugradnja prigušnice, ugradnja pasivnih ili aktivnih filtera.



Pasivni filteri su serijski spojevi kondenzatora i prigušnice kojima je rezonantna frekvencija podešena tako da odgovara frekvenciji harmonika napona koji se želi prigušiti (eliminirati). Impedancija pasivnog filtera 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 filtera kako bi se prigušilo tri

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

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

najznačajnija viša harmonika (5., 7., i 11.) što ih stvaraju pretvarači frekvencije.

Aktivni harmonički filteri 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 filtera ovisi o veličini harmoničkih struja koje stvara nelinearna potrošnja. Aktivni ispravljači suvremenih ŠIM pretvarača frekvencije mogu se koristiti i kao aktivni filteri ukoliko im je snaga dovoljna da savlada harmoničko izobličenje struje u sustavu. Kvaliteta rada odnosno izobličenje filtrirane struje ovisi o frekvenciji rada (prekapanja) aktivnog filtera. S višom frekvencijom se postiže bolja kvaliteta energije ali je to povezano i s većim gubicima prekapanja punoupravljivih ventila aktivnog filtera.

DOPUNSKA LITERATURA:

1. **B. Skalicki, J. Grilec, Električni strojevi i pogoni**, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2005.
2. **M. Milković, Brodski električni strojevi i uređaji**, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik, 2005.
3. **T. Brodić, Osnove energetske elektronike**, Zigo, Rijeka, 2005.