

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

BRODSKI ELEKTRIČNI STROJEVI I SUSTAVI

Doc. dr. sc. Dubravko vučetić

Rijeka, 2011.

Sadržaj

1.	OSNOVE ELEKTROMAGNETIZMA	1
1.1.	FORMIRANJE MAGNETSKOG POLJA U ELEKTRIČNIM STROJEVIMA.....	1
1.2.	FARADAYEV ZAKON (POJAVA INDUCIRANOG NAPONA U VODIČU).....	1
1.3.	INDUCIRANJE NAPONA U ROTACIONIM STROJEVIMA	2
1.4.	ELEKTROMAGNETSKA SILA.....	2
2.	TRANSFORMATORI	3
2.1.	BRODSKI TRANSFORMATORI.....	3
2.2.	PINCIP RADA TRANSFORMATORA.....	3
2.3.	OSNOVNE JEDNADŽBE TRANSFORMATORA	4
2.4.	NADOMJESNA SHEMA TRANSFORMATORA.....	4
2.5.	PRAZNI HOD TRANSFORMATORA.....	6
2.6.	KRATKI SPOJ TRANSFORMATORA.....	6
2.7.	PAD NAPONA NA TRANSFORMATORU	7
2.8.	BILANCA SNAGE I STUPANJ KORISNOSTI TRANSFORMATORA	7
2.9.	GUBICI U BAKRU	8
2.10.	GUBICI ZBOG HISTEREZE	8
2.11.	GUBICI ZBOG VRTLOŽNIH STRUJA.....	9
2.12.	IZVEDBE JEZGRE JEDNOFAZNIH I TROFAZNIH TRANSFORMATORA.....	9
2.13.	HLAĐENJE TRANSFORMATORA	10
2.14.	TROFAZNI TRANSFORMATORI	11
2.15.	TRANSFORMATORI ZA RASVJETU	11
2.16.	AUTOTRANSFORMATOR	12
2.17.	NAPONSKI MJERNI TRANSFORMATORI.....	13
2.18.	STRUJNI MJERNI TRANSFORMATORI.....	13
2.19.	PARALELNI RAD TRANSFORMATORA	15
2.20.	TRANSFORMATOR ZA ZAVARIVANJE	15
2.21.	KVAROVI TRANSFORMATORA	16
3.	ASINKRONI MOTORI	16
3.1.	PRINCIP RADA ASINKRONOG MOTORA	17

3.2.	BILANCA SNAGE I STUPANJ KORISNOSTI ASINKRONOG MOTORA.....	18
3.3.	MOMENTNA KARAKTERISTIKA ASINKRONOG STROJA	19
3.4.	KARAKTERISTIKA STRUJE ASINKRONOG STROJA.....	20
3.5.	GENERATORSKO KOČENJE ASINKRONOG MOTORA NA PRIMJERU BRODSKOG TERETNOG VITLA (DIZALICE).....	20
3.6.	PROTUSTRUJNO KOČENJE ASINKRONOG MOTORA NA PRIMJERU VENTILATORA STROJARNICE	21
3.7.	UPUĆIVANJE KAVEZNIH ASINKRONIH MOTORA	21
3.8.	UPUĆIVANJE ASINKRONOG MOTORA POMOĆU DIREKTNOG UPUTNIKA 22	
3.9.	UPUĆIVANJE KAVEZNOG ASINKRONOG MOTORA POMOĆU UPUTNIKA ZVIJEZDA-TROKUT	23
3.10.	KOLUTNI ASINKRONI MOTORI	25
3.11.	ASINKRONI KAVEZNI MOTORI S POTISKIVANJEM STRUJE	26
3.12.	VIŠEBRZINSKI ASINKRONI MOTORI I DAHLANDEROVI SPOJEVI.....	27
3.13.	JEDNOFAZNI ASINKRONI MOTOR S KONDENZATOROM	28
3.14.	JEDNOFAZNI ASINKRONI MOTOR S KRATKO SPOJENOM POMOĆNOM FAZOM.....	29
3.15.	ODRŽAVANJE ASINKRONIH MOTORA	30
3.16.	KVAROVI ASINKRONIH MOTORA	30
4.	KOLEKTORSKI (ISTOSMJERNI) STROJEVI	32
4.1.	PRINCIP RADA ISTOSMJERNOG MOTORA.....	32
4.2.	PRINCIP RADA ISTOSMJERNOG GENERATORA	32
4.3.	VRSTE UZBUDE ISTOSMJERNIH STROJEVA.....	33
4.4.	UNIVERZALNI MOTOR	34
4.5.	REGULACIJA BRZINE VRTNJE ISTOSMJERNOG MOTORA S NEZAVISNOM UZBUDOM	35
4.6.	WARD-LEONARDOV SPOJ.....	35
4.7.	OSNOVNE JEDNADŽBE ISTOSMJERNOG STROJA	36
4.8.	REAKCIJA ARMATURE	37
4.9.	ODRŽAVANJE ISTOSMJERNIH STROJEVA	38
4.10.	SINKRONI GENERATORI	38
4.11.	REAKCIJA ARMATURE SINKRONOG GENERATORA I KUT OPTEREĆENJA	39

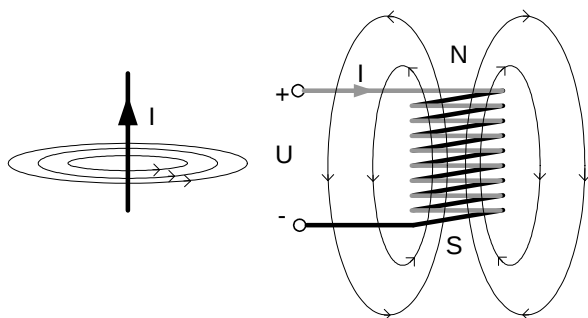
4.12.	MOMENTNA KARAKTERISTIKA SINKRONOG STROJA	40
4.13.	KRIVULJA PRAZNOG HODA SINKRONOG GENERATORA	41
4.14.	PAD NAPONA KOD OPTEREĆENJA SINKRONOG GENERATORA	41
4.15.	KONSTRUKCIJA ROTORA SINKRONOG GENERATORA	42
4.16.	NADOMJESNA SHEMA SINKRONOG GENERATORA	43
4.17.	INVERTIRANI SINKRONI GENERATOR.....	44
4.18.	SINKRONI GENERATOR S ČETKICAMA I NEZAVISNOM UZBUDOM.....	45
4.19.	SAMOUZBUDNI SINKRONI GENERATOR S ČETKICAMA	45
4.20.	SAMOUZBUDNI BEZKONTAKTNI SINKRONI GENERATOR.....	46
4.21.	KOMPAUNDNI SINKRONI GENERATOR	47
4.22.	POGONSKI DIJAGRAM DIZEL-GENERATORA I NAZIVNI $\cos\varphi$ SINKRONOG GENERATORA	48
4.23.	SINKRONI MOTOR	48
4.24.	UPUĆIVANJE SINKRONIH MOTORA.....	50
4.25.	V-KRIVULJE SINKRONOG MOTORA.....	51
4.26.	AKUMULATORSKE BATERIJE	52
5.	EKSPLOATACIJA BRODSKIH ELEKTRIČNIH UREĐAJA.....	55
5.1.	SPECIFIČNOSTI PRIMJENE ELEKTRIČNIH UREĐAJA NA BRODOVIMA..	55
5.2.	STRUJNI UDAR.....	56
5.3.	MJERE TEHNIČKE ZAŠTITE OD STRUJNOG UDARA.....	57
5.4.	MJERE OSOBNE ZAŠTITE PRI RADU S ELEKTRIČNOM STRUJOM	58
5.5.	PROTUEKSPLOZIJSKA ELEKTRIČNA OPREMA.....	59
5.6.	KLIMATSKI UVJETI EKSPLOATACIJE BRODSKIH ELEKTRIČNIH UREĐAJA.....	62
5.7.	MEHANIČKA ZAŠTITE ELEKTRIČNIH UREĐAJA IP	63
5.8.	STATIČKI ELEKTRICITET.....	64
5.9.	GROMOBRAN	64
5.10.	ELEKTROMAGNETSKA KOMPATIBILNOST	65
6.	PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE NA BRODU	65
6.1.	IZVORI ELEKTRIČNE ENERGIJE NA BRODU	66
6.2.	DIZEL-GENERATORI	66
6.3.	OSOVINSKI GENERATORI.....	68

6.4.	OSOVINSKI GENERATOR NA BRODU S BRODSKIM VIJKOM S PREKRETNIM KRILIMA (CPP)	70
6.5.	OSOVINSKI GENERATOR SPOJEN PREKO VARIJATORA (CON-SPEED)..	71
6.6.	OSOVINSKI GENERATOR SA STATIČKIM PRETVARAČEM FREKVENCije 71	
6.7.	GENERATOR ZA NUŽNOST.....	72
6.8.	LUČKI GENERATOR	73
6.9.	NAPAJANJE S KOPNA.....	73
6.10.	PARALELNI RAD GENERATORA	74
6.11.	SINKRONIZACIJA	75
6.12.	RASPODJELA DJELATNE SNAGE	76
6.13.	KARAKTERISTIKE REGULACIJE FREKVENCije f(P).....	77
6.14.	RASPODJELA DJELATNE SNAGE [kW] IZMEĐU DVA DIZELGENERATORA	78
6.15.	RASPODJELA DJELATNE SNAGE [kW] IZMEĐU DIZELGENERATORA I OSOVINSKOG GENERATORA.....	79
6.16.	RASPODJELA JALOVE SNAGE [kVAr].....	80
7.	RASKLOP I RAZDIOBA ELEKTRIČNE ENERGIJE NA BRODU.....	81
7.1.	NEUZEMLJENI BRODSKI ELEKTRIČNI SUSTAV	81
7.2.	UZEMLJENI BRODSKI ELEKTRIČNI SUSTAV	82
7.3.	SHEME RAZVODA.....	83
7.4.	SELEKTIVNA ZAŠTITA OD KRATKOG SPOJA	86
7.5.	SKLOPNE PLOČE	87
7.6.	BRODSKI ELEKTRIČNI KABELI	88
7.7.	SKLOPNI UREĐAJI	89
7.8.	ELEKTRIČNE ZAŠTITE GENERATORA.....	90
8.	BRODSKI ELEKTROMOTORNI POGONI	92
8.1.	OPĆENITO O ELEKTROMOTORNIM POGONIMA	92
8.2.	ELEKTRIČNE ZAŠTITE ELEKTROMOTORA	95
8.3.	ELEKTROMOTORNI POGONI KORMILARSKIH UREĐAJA	96
8.4.	ELEKTROMOTORNI POGONI BOČNIH PORIVNIKA.....	96
8.5.	ELEKTROMOTORNI POGONI BRODSKIH PUMPI, VENTILATORA I KOMPRESORA.....	97

8.6.	ELEKTROMOTORNI POGONI SIDRENIH, PRITEZNIH I TERETNIH VITALA	98
8.7.	ELEKTRIČNI PORIV BRODA	98
8.8.	POMOĆNA PROPULZIJA	102
9.	BRODSKA ELEKTRIČNA RASVJETA.....	102
9.1.	SUSTAVI BRODSKE RASVJETE.....	102
9.2.	IZVORI SVJETLOSTI	103
9.3.	FLUORESCENTNE LAMPE.....	104
10.	DOPUNSKA LITERATURA:	106

1. OSNOVE ELEKTROMAGNETIZMA

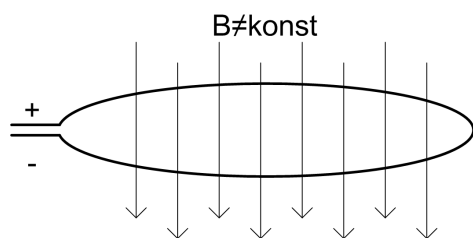
1.1. FORMIRANJE MAGNETSKOG POLJA U ELEKTRIČNIM STROJEVIMA



Oko vodiča kojim teče struja stvara se magnetsko polje. Jakost magnetskog polja H proporcionalna je umnošku broja zavoja N i struje I , a obrnuto proporcionalna srednjoj duljini magnetskih silnica l . 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.

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

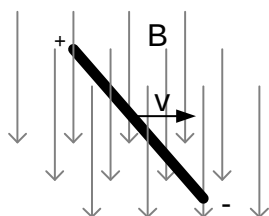
1.2. FARADAYEV ZAKON (POJAVA INDUCIRANOG NAPONA U VODIČU)



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. Inducirani napon jednak je umnošku broja zavoja vodljive petlje i derivacije obuhvaćenog magnetskog toka po vremenu.

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

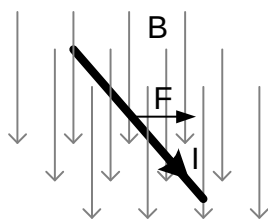
1.3. INDUCIRANJE NAPONA U ROTACIONIM STROJEVIMA



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. Inducirani napon je jednak umnošku magnetske indukcije **B**, duljine vodiča **l** i brzine vodiča **v**. Ako se strujni krug zatvori inducirani napon će potjerati struju koja stvara elektromagnetsku silu koja nastoji zaustaviti vodič.

$$e = Blv$$

1.4. 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. Sila je proporcionalna magnetskoj indukciji **B**, jakosti struje **I** i duljini vodiča **l**.

$$F = BIl$$

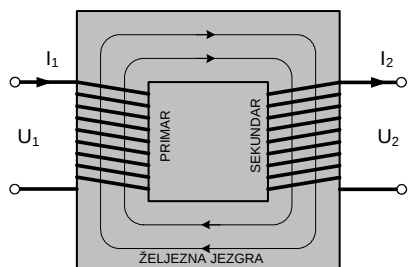
2. **TRANSFORMATORI**

2.1. **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 nabrojenih 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.

2.2. **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



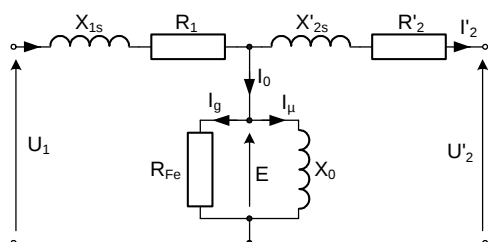
na sekundar ($S_2=U_2I_2$) mora se na primarnoj strani uzeti iz izvora na koji je transformator priključen što znači da se s opterećenjem sekundara povećava ne samo njegova sekundarna već i primarna struja.

2.3. 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.

2.4. 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 međuinduktiviteta. Ne smije se međutim zaboraviti da su u stvarnosti primarni i sekundarni namoti potpuno odvojeni i međusobno izolirani (osim kod autotransformatora).

$$U'_2 = \frac{N_1}{N_2} U_2 \quad I'_2 = \frac{N_2}{N_1} I_2 \quad R'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_2$$

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

gdje je: N_1 - broj zavoja primarnog namota

N_2 - broj zavoja sekundarnog namota

I_1 - struja primara

I'_2 - reducirana struja sekundara

I_0 - struja praznog hoda

I'_μ - struja magnetiziranja

I_g - struja gubitaka u željezu

U_1 - napon primara

U'_2 - reducirani napon sekundara

E - inducirani napon

R_1 - otpor primara

R'_2 - reducirani otpor sekundara

R_{Fe} - otpor za izračunavanje gubitaka u željezu

$X_{1\sigma}$ - rasipna reaktancija primara

$X'_{2\sigma}$ - reducirana rasipna reaktancija sekundara

X_0 - glavna reaktancija transformatora

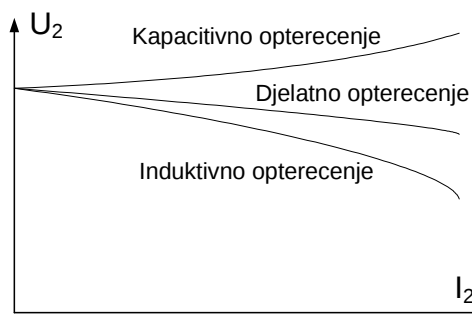
2.5. PRAZNI HOD TRANSFORMATORA

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.

2.6. 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.

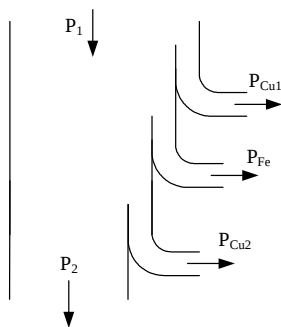
2.7. PAD NAPONA NA TRANSFORMATORU



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.

2.8. 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 sekundar 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 ($\cos\phi$)

2.9. 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).

$$P_{Cu1} = (3)I_1^2 R_1 \qquad P_{Cu2} = (3)I_2^2 R_2 \qquad (3) \qquad \text{za} \qquad \text{trofazne}$$

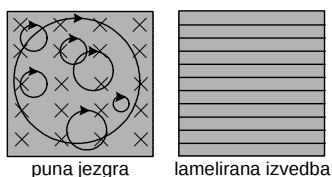
transformatore.

Gubici u bakru sekundara mogu se prema istoj formuli izračunati i koristeći reducirane veličine R'_2 i I'_2 .

2.10. 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.

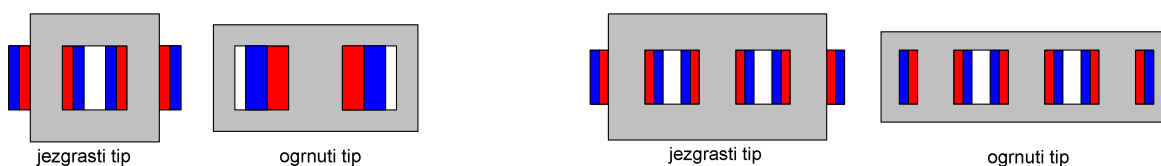
2.11. GUBICI ZBOG VRTLOŽNIH STRUJA



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 zagrijevaju 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.

2.12. 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.



2.13. HLAĐENJE TRANSFORMATORA

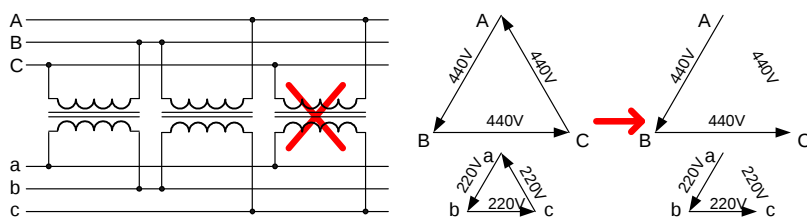
Kada je transformator u radu, gubici u željezu, neovisno o opterećenju, zagrijavaju dinamo limove odnosno jezgru transformatora. S druge strane gubici u bakru, koji su proporcionalni kvadratu struje (opterećenja), zagrijavaju primarne i sekundarne namote. Kako ne bi došlo do pregrijavanja navedenu toplinu 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 higroskopna (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 izvana 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.

2.14. TROFAZNI 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 $5 \times 30^\circ = 150^\circ$.

2.15. 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



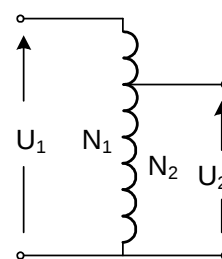
potrošnju a drugi je hladna rezerva za slučaj da se prvi pokvari i 2) tri jednofazna transformatora koji su svi

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.

2.16. 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 kabelu ili namotu transformatora na sekundaru pojavi potencijal (napon prema masi) primarne faze. Tipična snaga autotransformatora S_T je snaga koju bi imao obični dvonamotni transformator istih dimenzija kao autotransformator za koji je definirana. Tipična snaga zorno pokazuje veličinu uštede primjenom autotransformatora. Ušteda je to veća što je prijenosni omjer manji odnosno N_2/N_1 veće.

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

2.17. 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 obvezatno kako bi se smanjio rizik od spoja s masom i opasnost pri rukovanju električnom opremom.

2.18. 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 pregrijevaju 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 pregrijevaju 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.

2.19. 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.

2.20. 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 zavarivanja 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 odcjeka 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.

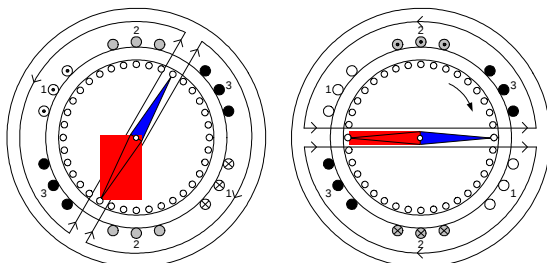
2.21. KVAROVI TRANSFORMATORA

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 (megerom): 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 uključenju 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.

3. ASINKRONI MOTORI

3.1. 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 n_s koja je proporcionalna frekvenciji f a obrnuto proporcionalna broju pari polova p statorskog namota:

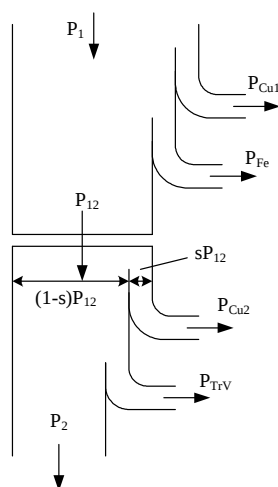
$$n_s = \frac{60f}{p}$$

Kod uključivanja motora na napon rotor stoji. Silnice okretnog magnetskog 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.

3.2. BILANCA SNAGE I STUPANJ KORISNOSTI ASINKRONOG MOTORA



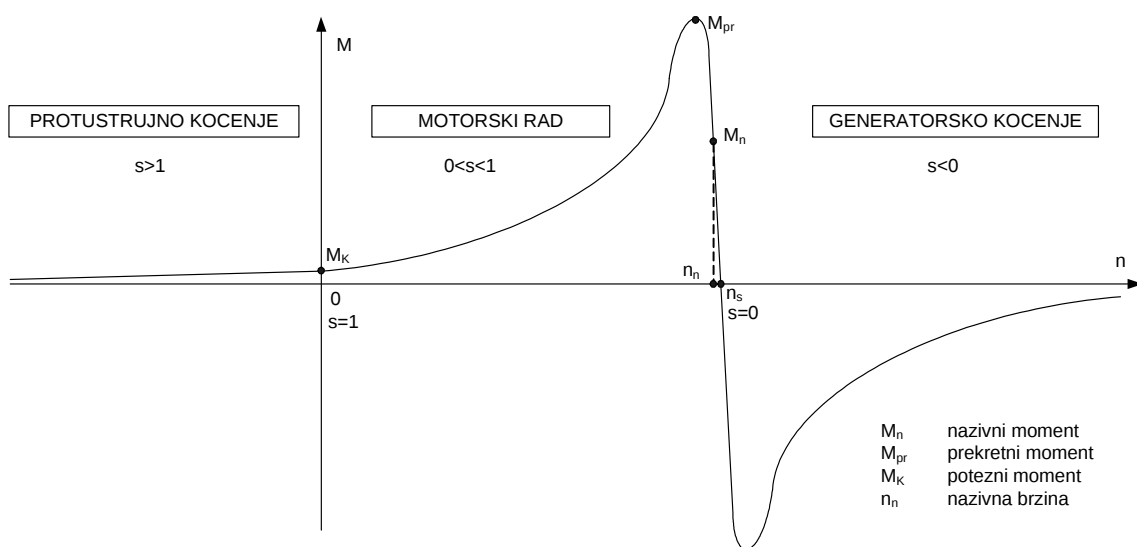
Bilanca snage pokazuje gubitke u stroju. Najprije se odbijaju gubici u bakru statora P_{Cu1} . Slijede gubici u željezu primara i statora P_{Fe} koji se odbijaju na statorskoj strani jer statorski namoti magnetiziraju željezo statora i rotora. Preostala snaga je snaga u zračnom rasporu P_{12} koja se 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.

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

3.3. MOMENTNA KARAKTERISTIKA ASINKRONOG STROJA

Momentnu karakteristiku asinkronog motora karakterizira vrlo mali potezni

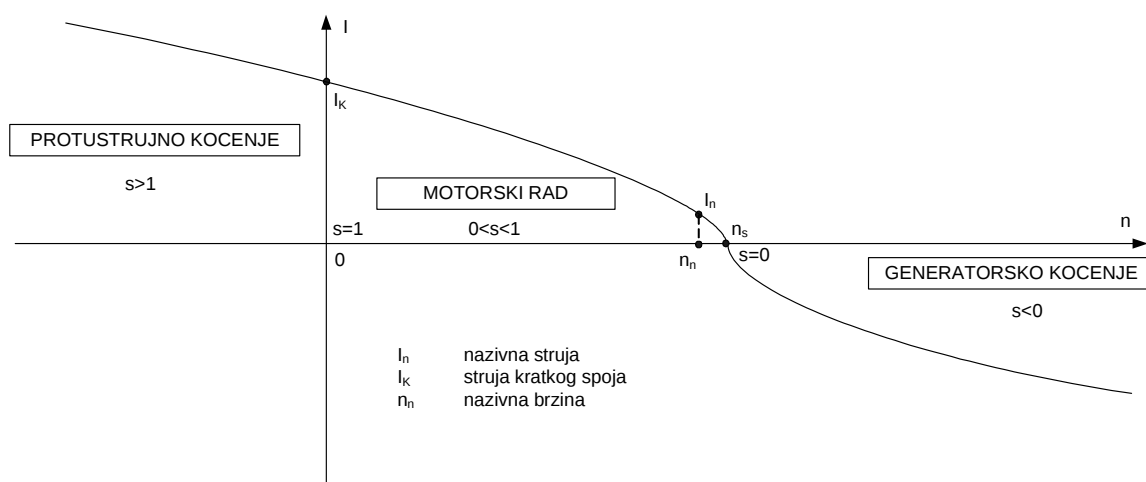


moment M_K , zbog čega se standardne izvedbe kaveznih motora ne mogu koristiti za pokretanje potencijalnog tereta (dizalice) već samo centrifugalnog (pumpe i ventilatori) ili mehanizama koji startaju rasterećeni (kompresori). Nakon zaleta pri kojem se na trenutak postigne maksimalni moment koji se naziva 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. Zavrtimo li motor vanjskim momentom preko sinkrone brzine moment postane negativan a motor prelazi u generatorsko kočenje i

vreća energiju u mrežu. Zamjenom dviju faza dok se motor još vrti započinje protustrujno kočenje koje razvija relativno mali kočni moment uz opasno pregrijavanje motora.

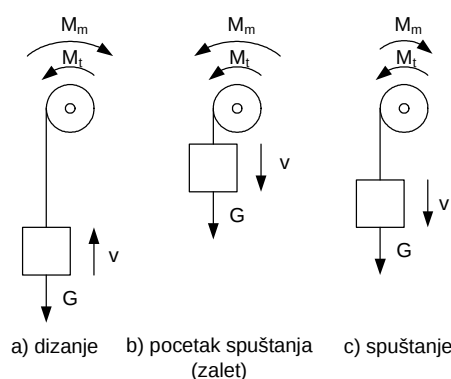
3.4. KARAKTERISTIKA STRUJE ASINKRONOG STROJA

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.

3.5. 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).

3.6. 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.

3.7. UPUĆIVANJE KAVEZNIH ASINKRONIH MOTORA

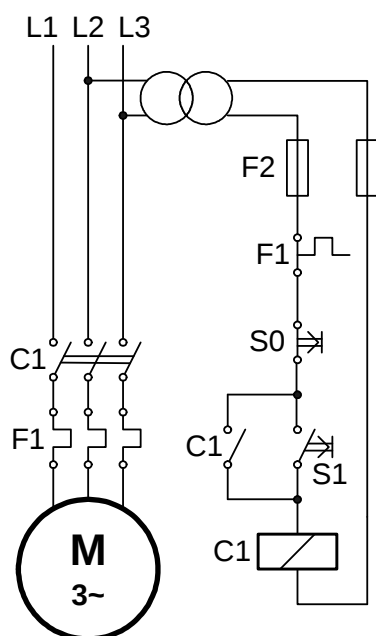
Asinkroni kavezni motori se u kopnenim postrojenjima u pravilu uključuju direktnim uputnikom i pri tome povuku iz mreže 5-7 puta veću struju od nazivne. Kako je brodska električna centrala, za razliku od kopnene mreže, relativno slaba u odnosu na snagu velikih brodskih elektromotornih pogona, veći se 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..

3.8. UPUĆIVANJE ASINKRONOG MOTORA POMOĆU DIREKTOG 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

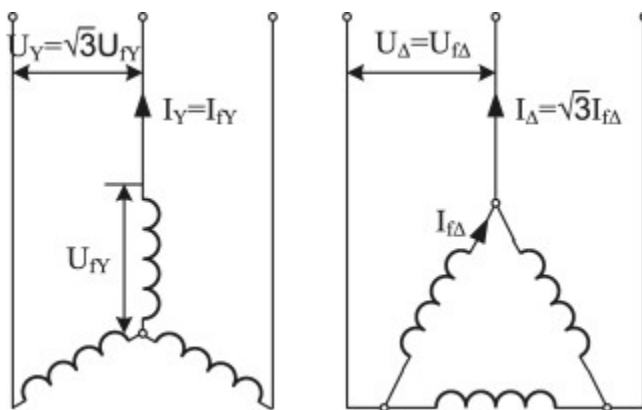


elektromagnetska sila povuče kotvu i svi njegovi kontakti promijene položaj. Tri glavna kontakta dovedu napon na motor i on se pokrene. Radni pomoćni kontakt spojen paralelno tipkalu S1 se uključuje što znači da se tipkalo može otpustiti pri čemu se vraća u otvoreni položaj. Sklopnik sada sam sebe drži 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 isključuje. 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.

3.9. UPUĆIVANJE KAVEZNOG ASINKRONOG MOTORA POMOĆU UPUTNIKA ZVIJEZDA-TROKUT

Kako bi se smanjila struja pokretanja većih asinkronih kaveznih motora koristi se

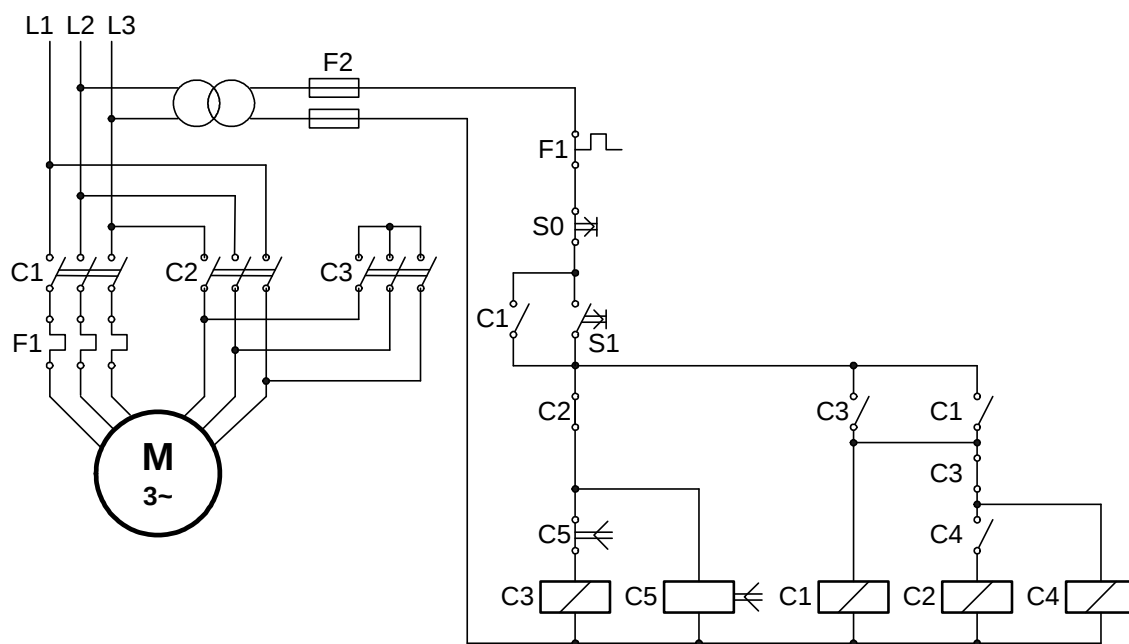


uputnik koji namote motora najprije spoji u zvijezdu da bi ih nakon zaleta prespojio u trokut. Motor naravno mora biti predviđen za trajni rad u spoju trokut. U spoju zvijezda su fazni namoti motora spojeni na $\sqrt{3}$ puta manji napon od nominalnog pa kroz njih teče i $\sqrt{3}$ puta manja struja 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 ($P = \sqrt{3}UI \cos \varphi$), 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 dosiže 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

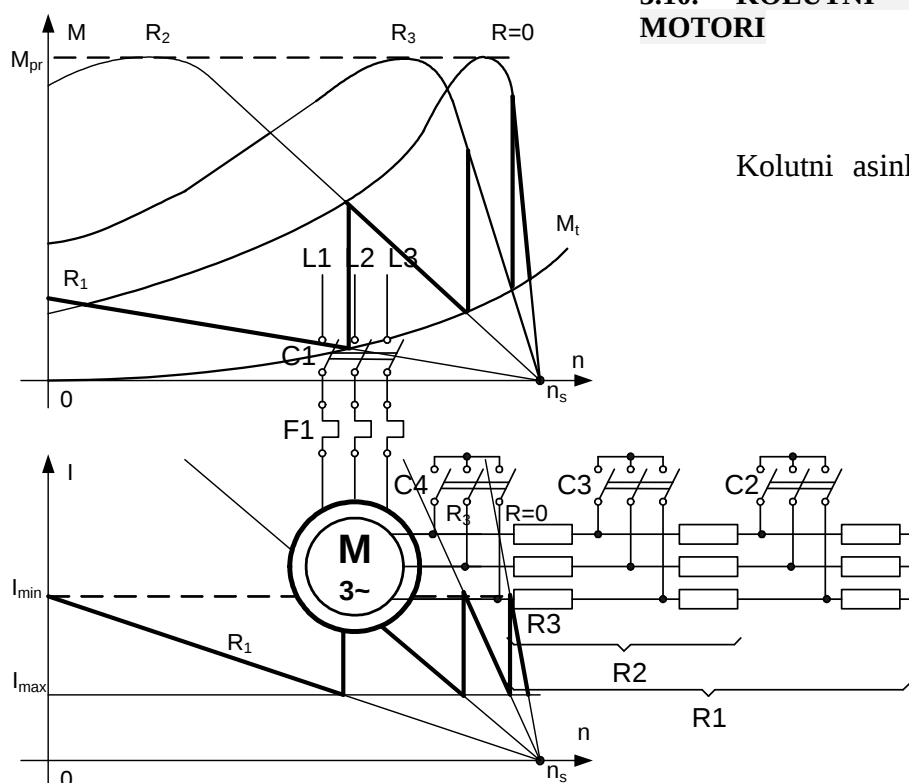


pa motor završava zalet i nastavlja raditi u spoju trokut. F1 je bimetalna zaštita motora od preopterećenja. Sklopnici sami po sebi predstavljaju podnaponsku zaštitu, dok se zaštita od kratkog spoja u pravilu ne stavlja u uputnik već je unutar razdjelnika snage sa kojeg se uputnik napaja ili u slučaju esencijalnih trošila u glavnoj razvodnoj ploči. Upravljački dio uputnika je u ovom slučaju transformatorom odvojen od energetskeg 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 odbrojavati dolaskom napona na njegove upravljačke stezaljke. Uključivanjem C3 uključio 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

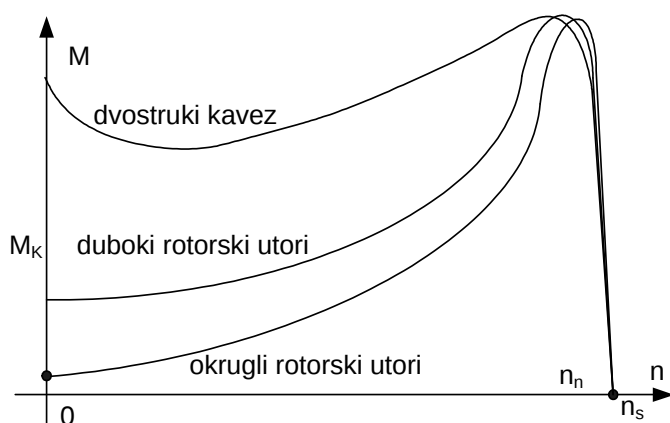
mirni kontakt C2 iznad špule C3. Budući da je sklopnik C3 uključen njegov mirni kontakt je otvoren pa prema tome nema napona na špulama C2 i C4. Uključivanjem C1 zatvaraju se njegovi glavni kontakti i motor započinje zalet u spoju zvijezda, ali i njegovi pomoćni radni kontakti: radni kontakt C1 spojen 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 kontakata C3 iznad C2 poteče struja kroz špulu releja C4 koji se uključi, što znači da se i njegov jedini radni kontakt preko kojeg se napaja špula C2 uključi, pa prema tome poteče struja kroz špulu C2 te se i on uključi. 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 uključenje 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) pregorijevanjem 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.

3.10. 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.

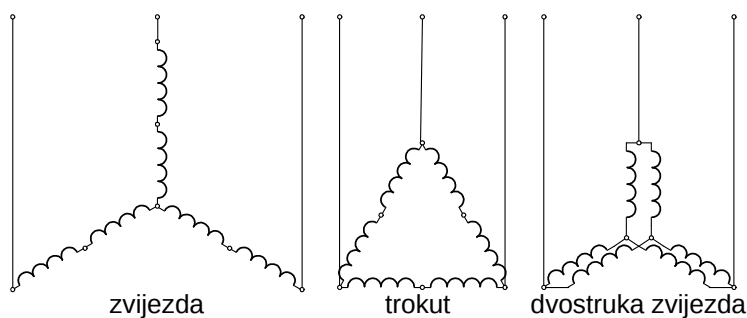
3.11. ASINKRONI KAVEZNI MOTORI S POTISKIVANJEM STRUJE

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 uključenja 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.

3.12. VIŠEBRZINSKI ASINKRONI MOTORI I DAHLANDEROVI SPOJEVI

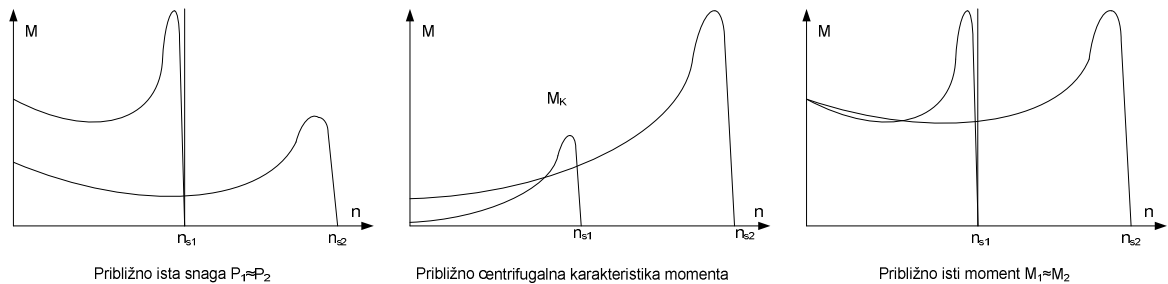
Višebrzinski asinkroni motori zasnivaju se na promjeni sinkrone brzine promjenom broja pari polova statorskog namota. Općenito postoje tri izvedbe: 1) s odvojenim



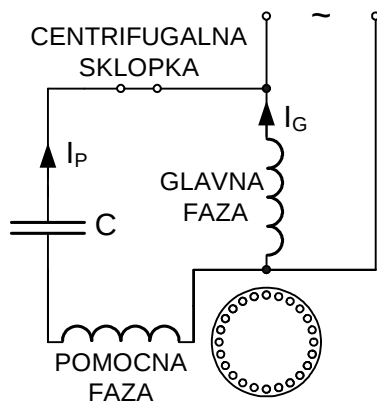
zasebnim namotima za svaku brzinu, 2) s preklapanjem polova (polnopreklopivi) na principu Dahlanderovih spojeva i 3) kombinacija zasebnog namota i namota u Dahlanderovim spojevima. U

varijanti zasebnih namota uključuje se za određenu brzinu vrtnje odgovarajući namot dok su drugi namoti izvan funkcije. Polnopreklopivi 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).



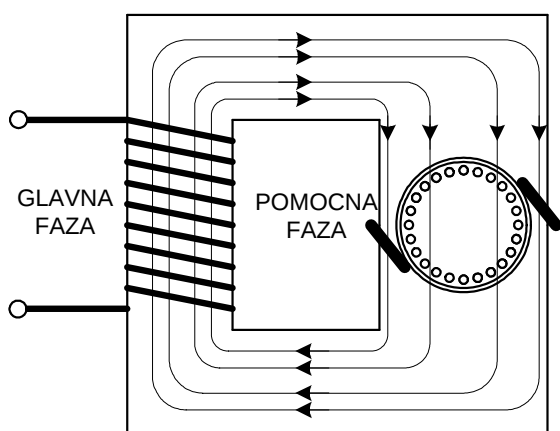
3.13. JEDNOFAZNI ASINKRONI MOTOR S KONDENZATOROM



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.

3.14. 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.

3.15. 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.

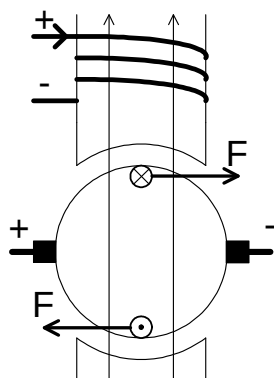
3.16. KVAROVI ASINKRONIH MOTORA

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 megaommetrom (megerom). 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. 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 osovinu 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 očitanjem 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.

4. KOLEKTORSKI (ISTOSMJERNI) STROJEVI

4.1. PRINCIP RADA ISTOSMJERNOG MOTORA



Na statoru istosmjernog motora se namotani na glavne polove nalaze uzбудni namoti kroz koje teče istosmjerna uzбудna 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.

4.2. PRINCIP RADA ISTOSMJERNOG GENERATORA

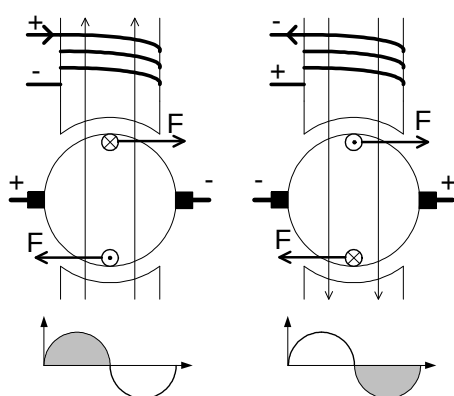
Svaki električni rotacijski stroj pa tako i istosmjerni stroj može raditi kao motor i kao generator, samo je tok energije a prema tome i princip rada drugačiji. Kao i kod istosmjernog motora na statoru se namotani na glavne polove nalaze uzбудni namotaji kroz koje teče istosmjerna uzбудna struja koja stvara glavno magnetsko polje koje je kao i struja koja ga je stvorila nepromjenljivo. Uzбудni namoti najčešće su spojeni na armaturne stezaljke (četkice) u kom slučaju uzбудnu struju daje sam generator koji se prema tome naziva samouzбудnim. 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).

4.3. VRSTE UZBUDE ISTOSMJERNIH STROJEVA

Uzбудni (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 uzбудni namoti spojeni na poseban, odvojeni, izvor napajanja riječ je o nezavisnoj uzbudu koja se dosta koristila u posljednjoj generaciji elektromotornih pogona s istosmjernim motorima koji su bili napajani preko tiristorskih ispravljača. Kod serijske uzbuđe je uzбудni 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 uzbuda je još uvijek interesantna zbog pogona viljuškara i univerzalnih motora, a nezavisna se još susreće na starim dizalicama.

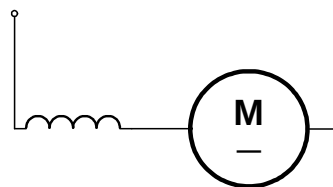
4.4. UNIVERZALNI MOTOR



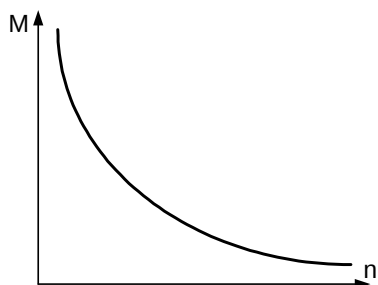
Iako su istosmjerni strojevi potpuno nestali iz upotrebe, jedna se njihova inačica - univerzalni motori - ne samo zadržala u proizvodnji već predstavlja najšire korišten motor u uređajima široke potrošnje. Univerzalni motori se teoretski mogu spojiti na izmjeničnu i na istosmjernu struju iako se u pravilu koriste samo za izmjeničnu. Zasnivaju se na vrlo jednostavnoj ideji: Smjer vrtanje istosmjernog

motora ostaje isti ako mu se istovremeno promijene smjerovi uzbuđne i armaturne struje.

Motor sa **serijskom** uzbuđom kojemu je struja armature ujedno i uzbuđna 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 uzbuđnih namota tako da je za rad na

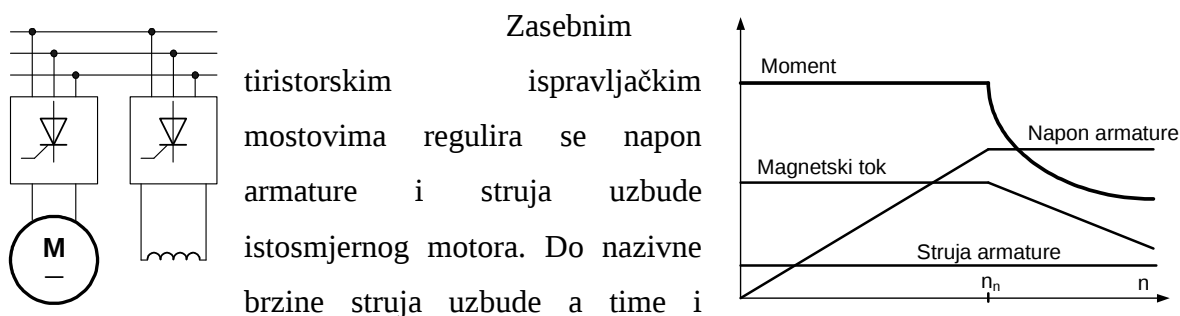


izmjeničnom priključku motoru potrebno dovesti veći napon nego kod priključka na istosmjernu struju. Kako je zbog serijskog spoja uzbuđna struja univerzalnog motora je ujedno i armaturna struja, kod pokretanja (svako pokretanje je kratkotrajni kratki spoj), kada motorom teče velika armaturna struja, 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

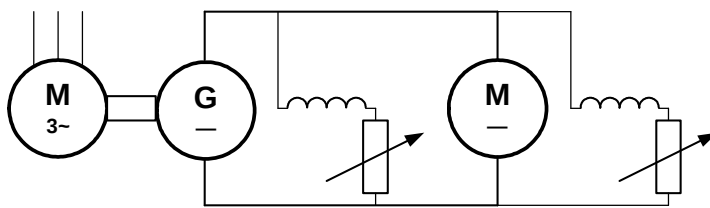
motori se koriste za ručne električne alate (bušilice, brusilice...), kućanske aparate (miksera, usisivače...) ali i za npr. napinjanje prekidača. Prednost im je što im maksimalna brzina vrtnje nije ograničena frekvencijom kao kod sinkronih i asinkronih motora (max 3600 o/min kod 60Hz) pa se mogu vrtjeti 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.

4.5. REGULACIJA BRZINE VRTNJE ISTOSMJERNOG MOTORA S NEZAVISNOM UZBUDOM



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 uzbuje 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 uzbudnom. Njegova snaga u stvari otprilike odgovara nazivnoj snazi motora kojeg pogoni.

4.6. 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 uzbude.

4.7. OSNOVNE JEDNADŽBE ISTOSMJERNOG STROJA

Moment je proporcionalan magnetskom toku (struji uzbude) i struji armature:

$$M = k_M \Phi I_a$$

Glavni magnetski tok je proporcionalan struji uzbude:

$$\Phi = k_u I_u$$

Inducirani napon je proporcionalan broju okretaja i magnetskom toku:

$$E = k_e n \Phi$$

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_ζ (2V bez obzira na struju):

$$U_a = E + I_a R_a + \Delta U_\zeta$$

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

$$U_a = E - I_a R_a - \Delta U_\zeta$$

4.8. 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 učinka 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.

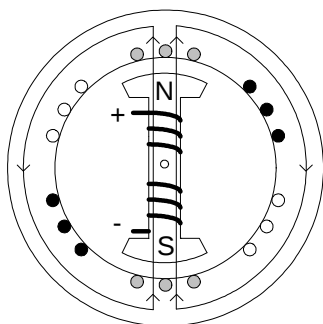
4.9. ODRŽAVANJE ISTOSMJERNIH STROJEVA

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. Iskre ne smiju biti preduge 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

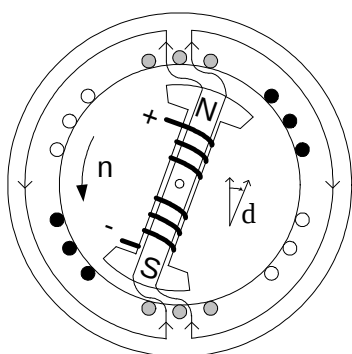
4.10. SINKRONI GENERATORI

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. Uzbudni namoti sinkronog generatora smješteni su na

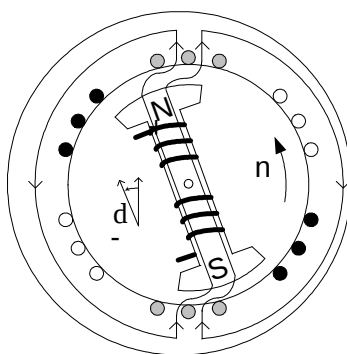


rotoru. Kroz njih teče istosmjerna struja i tako stvara nepromjenljivo magnetsko polje koje se zatvara kroz statorsko željezo. Pogonski stroj okreće rotor konstantnom brzinom pri čemu se zajedno s rotorom okreće i njegovo magnetsko polje. Silnice polja pri vrtnji sijeku statorske vodiče u kojima se zbog toga inducira napon. Statorski namot 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).

4.11. REAKCIJA ARMATURE SINKRONOG GENERATORA I KUT OPTEREĆENJA



MOTOR



GENERATOR

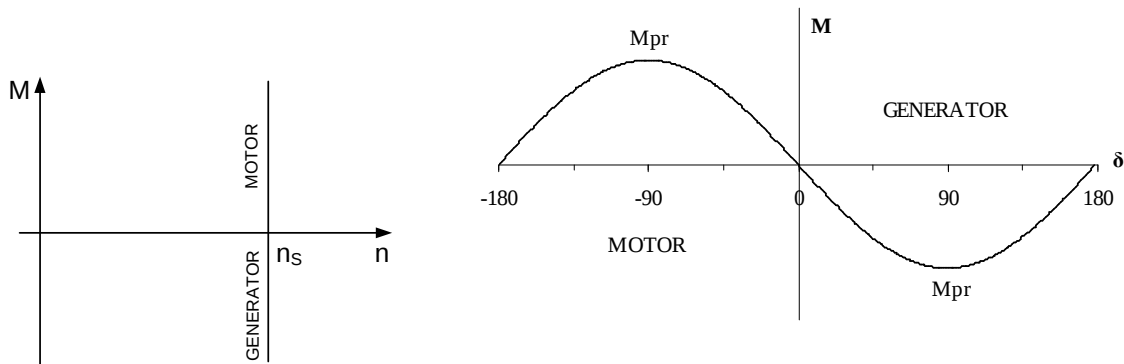
Da bi se bolje shvatile prilike u sinkronom generatoru, potrebno je analizirati i magnetsko polje koje stvaraju statorski (armaturni) namoti opterećenog sinkronog generatora a naziva se

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 uzbudnom strujom što teče njegovim uzbudnim namotom.

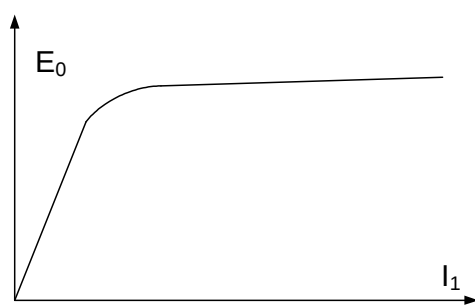
Gledano iz koordinatnog sustava rotora ta dva polja jedno naspram drugoga miruju pa se mogu jednostavno vektorski zbrojiti tako da se dobije resultantno magnetsko polje u generatoru. Kut δ , između resultantnog magnetskog polja i glavnog magnetskog polja (osi rotora) naziva se **kut opterećenja** i presudno 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 resultantno 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 resultantnim poljem.

4.12. MOMENTNA KARAKTERISTIKA SINKRONOG STROJA

Momentna karakteristika sinkronog stroja $M(n)$ je izuzetno jednostavna jer se sinkroni stroj vrti sinkronom brzinom neovisno o opterećenju (ako je ono manje od prekretnog momenta), tako da je karakteristika u stvari vertikalni pravac koji presijeca horizontalnu os (n) kod sinkrone brzine n_s . Mnogo je interesantnija karakteristika $M(\delta)$ koja pokazuje ovisnost momenta o kutu opterećenja. Vidi se da moment raste sve do prekretnog 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.



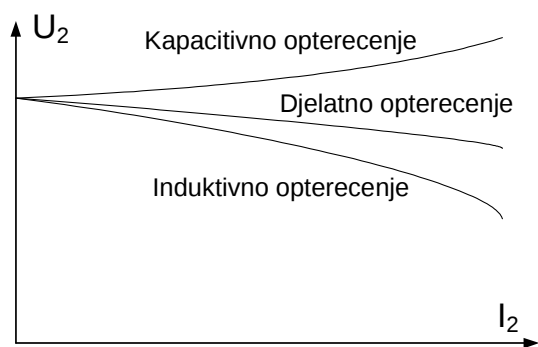
4.13. KRIVULJA PRAZNOG HODA SINKRONOG GENERATORA



Krivulja praznog hoda pokazuje ovisnost induciranog napona u praznom hodu E_0 o uzbudnoj 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 .

4.14. 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 resultantni magnetski tok. Zbog

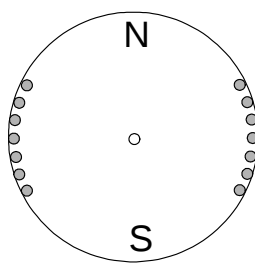
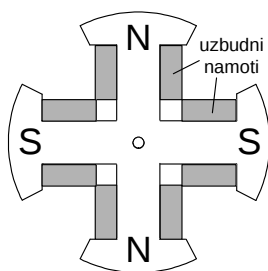


vektorskog zbrajanja statorskog okretnog magnetskog polja (reakcije armature) i rotorskog (glavnog) magnetskog polja, resultantno magnetsko polje može biti veće ili manje od glavnog magnetskog polja, zavisno od kuta među njima koji opet ovisi o vrsti opterećenja (induktivnom karakteru

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 inducirano napona. Kod kapacitivnog opterećenja (nema ga na brodu) reakcija armature jača glavno magnetsko polje pa se inducirani napon povećava. Smanjenje i povećanje inducirano 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 uzbudnih struja kompenziraju promjene napona kod opterećenja, ovi propadi napona čine se u praksi mnogo manjim nego što stvarno jesu.

4.15. KONSTRUKCIJA ROTORA SIKRONOG GENERATORA

Zavisno prije svega od nazivnog broja okretaja sinkroni generator može imati dvije

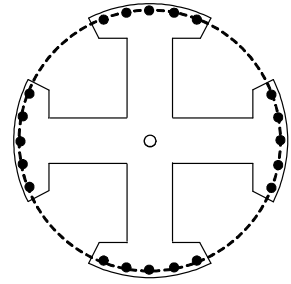


različite vrste rotora: hidro-rotor i turbo-rotor. Hidro-rotor (slika lijevo) ima isturene polove na koje su namotani uzbudni namoti. Relativno je velikog promjera i male duljine. Takva konstrukcija zbog jakih centrifugalnih

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.

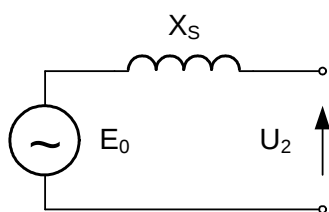
Relativno je malog promjera i velike duljine i podnosi mnogo veće brzine. Koristi se za brzine od 1000 o/min naviše.

Prigušni kavez je poseban dodatni rotorski namot koji svojim oblikom odgovara rotorskom namotu kaveznog asinkronog motora. Smješten u utore u polovima rotora i ima više funkcija: 1) Kod pogona generatora dizel-motorom nastaju torzione vibracije (trzaji) u osovini povezane s taktovima cilindra motora. Zbog toga je važno da dizel-motori za pogon generatora imaju što veći broj cilindra 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 njihanje 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.



4.16. 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

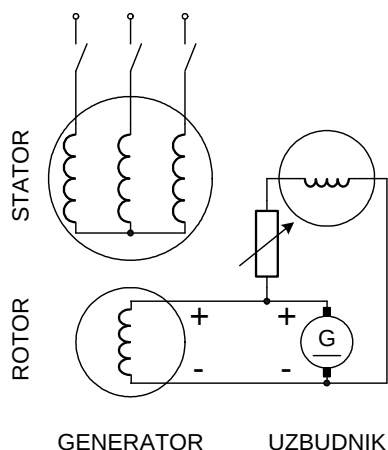


još dvije različite reaktancije za različite brzine promjene struje. Sinkrona reaktancija se koristi za izračunavanje trajne struje kratkog spoja i pada napona kod stacionarnog opterećenja. Početna (subtranzijentna) reaktancija X_d'' je mnogo manja od X_s i koristi se za izračunavanje početne struje 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. Uzbudni 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 predočeno je prijelaznom reaktancijom X_d' . Nakon što je potrošena i energija uzbudnog namota struja kratkog spoja padne na trajnu vrijednost određenu sinkronom reaktancijom.

4.17. INVERTIRANI SINKRONI GENERATOR

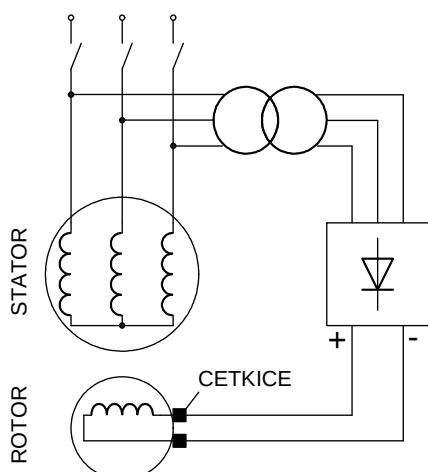
Invertirani sinkroni generatori su se proizvodili i ugrađivali na brodove u godinama nakon prelaska s istosmjerne na izmjeničnu struju jer je tehnologija njihove izrade vrlo slična tehnologiji izrade istosmjernog generatora. Kod invertiranog sinkronog generatora su zamijenjene uloge statora i rotora i jako nalikuje na istosmjerni generator. Uzbudni 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 samouzbuđenog beskontaktnog sinkronog generatora.

4.18. SINKRONI GENERATOR S ČETKICAMA I NEZAVISNOM UZBUDOM



Nezavisna uzbuda generatora koristila se u doba dok još nije bilo diodnih ispravljača pa se istosmjerna struja za uzbudu mogla dobiti samo iz istosmjernog generatora. Ujedno se regulacijom struje uzbude istosmjernog generatora vrlo jednostavno regulirala i struja uzbude, 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.

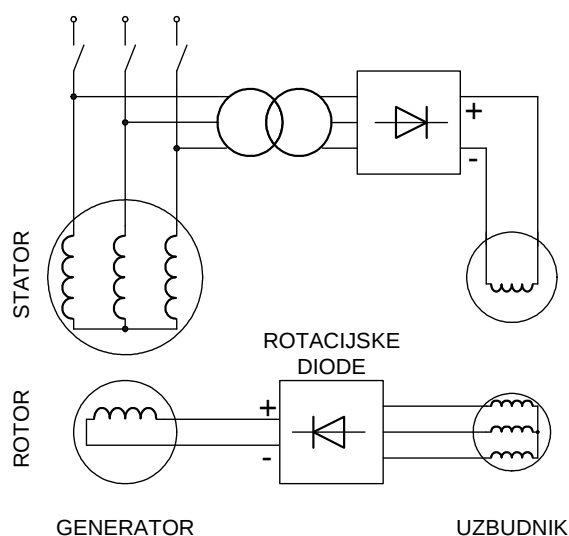
4.19. SAMOUZBUDNI SINKRONI GENERATOR S ČETKICAMA



Samouzbudni sinkroni generator sam proizvodi električnu energiju za svoju uzbudu. Generirani napon sinkronog generatora se ispravlja pomoću diodnog mosta i preko četkica i kliznih koluta 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 koluti 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 uzbuđe i tako pokrenuti proces samouzbuđe, koji traje nekoliko sekundi.

4.20. 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 koluta) i invertiranog sinkronog generatora koji mu služi kao uzбудnik, odnosno

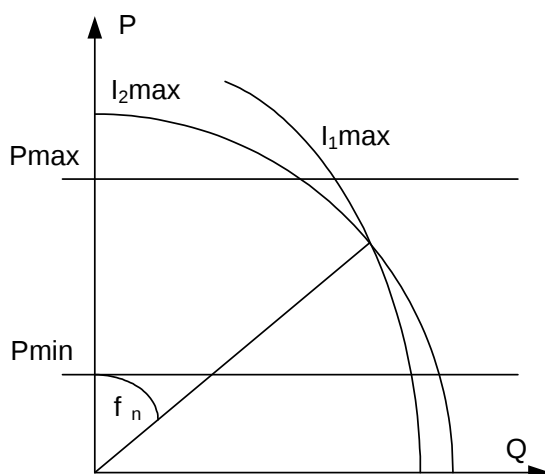
osigurava struju uzbuđe. Kada pogonski stroj (dizel motor) vrti generator generirani napon sinkronog generatora, koji nastaje presijecanjem trofaznih vodiča statora magnetskim poljem rotora, ispravlja se pomoću diodnog mosta i dovodi na statorski uzbudni namot uzbudnika. Na vodičima trofaznog rotorskog namota uzbudnika, zbog presijecanja magnetskog polja statora (uzbuđe) 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 samouzbude.

4.21. 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 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 uzbuđu. Kako kod istosmjerne struje nema faznog pomaka između struje i napona i postoji samo djelatno opterećenje bilo je moguće precizno podesiti jačinu serijske uzbuđe 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 uzbuđe 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.

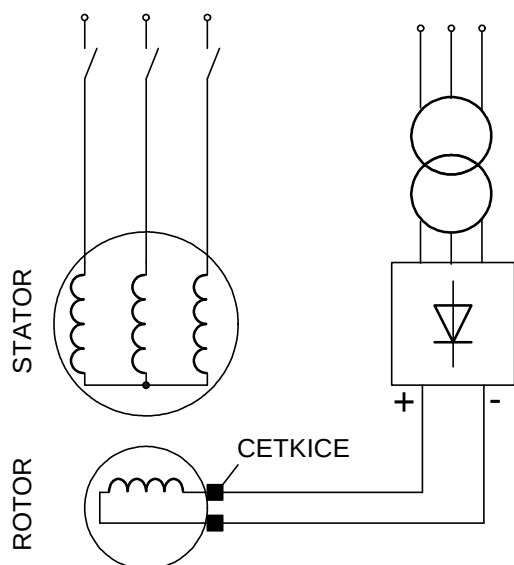
4.22. POGONSKI DIJAGRAM DIZEL-GENERATORA I NAZIVNI $\cos\varphi$ SINKRONOG GENERATORA



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 $\cos\varphi$ koji bi bio niži od onoga predviđene potrošnje. Na brodu se zbog prevladavajućeg udjela asinkronih motora u potrošnji električne energije uobičajeno računa s $\cos\varphi=0,8$. Nazivni $\cos\varphi$ 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 $\cos\varphi$ 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.

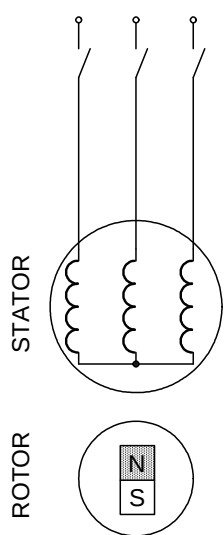
4.23. SINKRONI MOTOR



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.

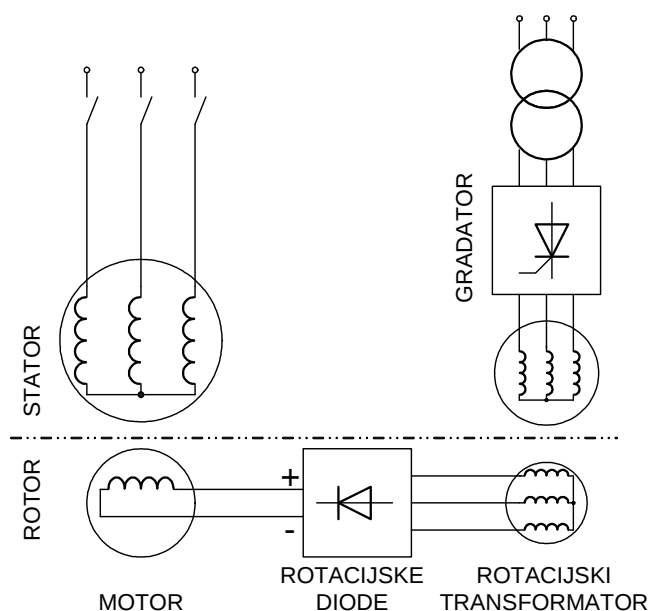
Za razliku od sinkronih generatora koji moraju imati uzbudne namote kako bi im se uzbudnom strujom moglo regulirati napon, najmodernije verzije sinkronih motora imaju na rotoru ugrađene izuzetno snažne permanentne magnete. Osnovna prednost izvedbe s permanentnim magnetima je veća specifična snaga što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

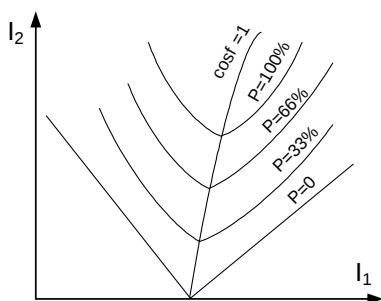
generatorima. Umjesto klasičnog uzбудnika kao kod sinkronih samouzbudnih bezkontaktnih generatora motori imaju tzv. rotacijski transformator (ROTATING TRANSFORMER) koji je po svojoj konstrukciji vrlo sličan asinkronom kolutnom motoru. Iako bezkontaktni sinkroni generator može preći u motorski rad (kojom 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 uzбудnik (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 uzbuđi sinkronog motora.



4.24. 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 statovski 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.

4.25. V-KRIVULJE SINKRNOG MOTORA



Regulacija uzbudne struje ipak može ponekad biti i korisna kada se želi podešavati faktor snage ($\cos\varphi$) 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 statorska 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 $\cos\varphi=1$)

4.26. 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 akumulatore i čelične akumulatore.

Punjenje i pražnjenje akumulatora: Akumulatori se pune iz punjača. Napon punjenja olovnih 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 potrošača 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 klema i premazivanje klema 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 priključenoj 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.

5. EKSPLOATACIJA BRODSKIH ELEKTRIČNIH UREĐAJA

5.1. SPECIFIČNOSTI PRIMJENE ELEKTRIČNIH UREĐAJA NA BRODOVIMA

Iako se gotovo svi brodski električni uređaji u istom ili vrlo sličnom obliku mogu naći i u kopnenim električnim sustavima, ipak je njihova eksploatacija u uvjetima broda, općenito mnogo zahtjevnija. Zbog toga sve brodske izvedbe električnih uređaja, kao uostalom i sva ostala brodska oprema moraju zadovoljiti mnogo strože uvjete, koji su detaljno propisani pravilima i propisima nacionalnih klasifikacijskih društava kolokvijalno zvanih Registrima. Zadaća klasifikacijskih ustanova je da propisuju pravila za gradnju i nadzor brodova koja u biti reguliraju minimalne zahtjeve za sigurnost broda, tereta i posade. Pravila svih relevantnih Registrara zasnivaju se na SOLAS konvenciji i pravilima IEC-a (International Electrotechnical Commission) odnosno IEEE-a (Institute of Electrical and Electronics Engineers), i stoga su vrlo slična. Registri odobravaju projektnu dokumentaciju prije početka gradnje, preko ovlaštenih instituta kontroliraju svu opremu i materijale koji se ugrađuju na brod i izdaju ATEST bez kojeg je ugradnja zabranjena, nadziru gradnju broda, sva ispitivanja i puštanja u pogon te probnu vožnju. Registri također periodički pregledavaju brod tijekom njegove eksploatacije. Najpoznatiji svjetski Registri brodova su Lloyd Register of Shipping, American Bureau of Shipping, Bureau Veritas, Det Norske Veritas, Germanischer Lloyd, Registro Navale Italiano... Hrvatski Registar brodova (HRB) također ima Pravila za gradnju brodova u kojima su u poglavlju 12. (Električna oprema) propisana pravila koja se odnose na brodske električne uređaje i sustave, a u poglavlju 13. pravila vezana za automatizaciju.

Kada je riječ o električnoj opremi, Pravila za gradnju brodova Registrara usmjerena su prema povećanju sigurnosti od električnog udara, požara i eksplozije, raspoloživost svih

vitalnih brodskih sustava ovisnih o električnoj opremi, otpornosti na klimatske uvjete i uvjete brodske okoline te elektromagnetsku kompatibilnost.

Brod je specifičan po tome što je dok plovi izoliran od kopnene infrastrukture što znači da se od uređaja i sustava traži zalihost i robusnost, te jednostavnost rukovanja, dijagnostike i održavanja kako bi i relativno neuka posada mogla vlastitim snagama zadržati brod u funkciji. Kako je primarni cilj broda prijevoz što veće količine tereta od brodskih se električnih uređaja očekuje da imaju što manju težinu i volumen, jer se na taj način povećava koristan prostor i nosivost broda.

Pored nesumnjivih prednosti kao što su: trenutna spremnost za pogon, jednostavnost prijenosa energije, jednostavna pretvorba u druge oblike energije (mehaničku, svjetlosnu, kemijsku i toplinsku), stabilne pogonske karakteristike, visoki stupanj pouzdanosti, jednostavnost rukovanja i održavanja, visoki stupanj korisnosti, dug životni vijek i neznatan utjecaj na okoliš, brodski električni uređaji i sustavi, odnosno električna energija općenito, na brodu imaju i tri vrlo značajna nedostatka: 1) opasnost od strujnog udara, 2) opasnost od izazivanja požara i eksplozije i 3) osjetljivost na vlagu.

5.2. STRUJNI UDAR

Do strujnog udara dolazi kada se električni krug zatvori kroz čovjeka i pri tome poteče struja koja prelazi njegov prag osjeta (0,6-3mA). Jačina i posljedice strujnog udara ovise o frekvenciji struje (visokofrekventne struje su manje opasne), putu prolaska struje kroz čovjeka, trajanju strujnog udara i jakosti struje koja pri tome teče kroz čovjeka. Najmanje su opasni strujni udari koji se zatvore unutar pojedinih ekstremiteta (prsti, ruka, noga) pa struja ne prolazi kroz vitalne organe od kojih je neusporedivo najvažnije srce. Kod takvih strujnih udara posljedice se kreću od neugodnog osjećaja, preko različitih intenziteta boli do manjih i vrlo jakih opekotina. Najopasniji su međutim strujni udari kada se strujni krug zatvori kroz srce (ruka-ruka i ruka-noga) kad i bez vidljivih ozljeda može zbog zatajenja rada srca nastupiti smrt. Kada je riječ o jakosti struje treba najprije posebno istaknuti da iako je formalno točno da ubija struja (mA) a ne napon (V), ne treba nikada zaboraviti činjenicu da je napon taj koji tjera struju i da visina struje, prema tome, prije

svega izravno ovisi o naponu. Treba se dakle čuvati svih električnih uređaja koji su pod naponom višim od **50V**. Standardni brodski naponi od 220 i 440V više su nego dovoljno visoki da ubiju većinu ljudi, a struja koje će pri tome kroz njih poteći ovisiti će o nizu objektivnih i individualnih faktora koje je nemoguće procijeniti ili predvidjeti (npr. vlažnost kože u trenutku udara). Nakon već spomenutog praga osjeta 0,6-3mA, struje od 10-15mA izazivaju grčenje mišića, 20-25mA probleme s disanjem, a preko 50mA smrtnu opasnost. Struja preko 100mA izaziva gotovo sigurnu smrt, ali treba naglasiti da sve navedene vrijednosti jako ovise i o trajanju strujnog udara, tako da ni struja od 100mA neće ubiti čovjeka ako je vrijeme trajanja strujnog udara bilo kraće od 0,1s.

Djelovanje strujnog udara na čovjeka možemo podijeliti na: **biološko** (grčenje mišića, treperenje i paraliza srca, paraliza disanja, nesvjestica, smrt), **toplinsko** (vanjske i unutarnje opekotine, zagrijavanje krvnih žila), **elektrolitsko** (rastvaranje krvi i drugih tjelesnih tekućina) i **mehaničko** (lomljenje kostiju, iščašenje zglobova, kidanje mišića i tetiva). Elektrolitsko i mehaničko djelovanje vezano je u pravilu za snažne strujne udare na visokonaponskim postrojenjima.

5.3. MJERE TEHNIČKE ZAŠTITE OD STRUJNOG UDARA

Mjere tehničke zaštite od u strujnog udara su tehnička rješenja kojim se kod projektiranja sustava smanjuje opasnost od udara električne struje, a zasnivaju se već opisanim faktorima koji utječu na posljedice i jačinu strujnog udara, pa se tako nastoji: onemogućiti dodir s dijelom uređaja koji je pod naponom, ograničiti jakost struje (napon dodira) na bezopasan iznos i ograničiti vrijeme trajanja strujnog udara. Najznačajnija i najviše korištena tehnička mjera za zaštitu od strujnog udara je **zaštitno uzemljenje** koje je u slučaju broda ispravnije zvati **izjednačenjem potencijala**. Riječ je naime o izjednačenju potencijala svih dostupnih vodljivih dijelova s potencijalom trupa, što se postiže kvalitetnim spajanjem svih tijelu dostupnih metalnih dijelova s metalnim trupom broda. Na taj način se ne može dogoditi da se kod spoja faze na kućište uređaja (npr. elektromotora) pojavi napon između njega i drugih vodljivih dijelova u okolini, što bi predstavljalo opasnost za čovjeka jer bi u slučaju dvostrukog kontakta moglo potjerati struju kroz njegovo tijelo. Zaštitno uzemljenje u užem smislu koristi se na uzemljenim

elektroenergetskim sustavima kod kojih spoj faznih vodiča s masom potjera struju koja inicira prorađu zaštite i time isključenje uređaja u kvaru. Izjednačenje potencijala odnosno zaštitno uzemljenje nije potrebno na uređajima koji su izvana presvučeni ili izrađeni od izolacijskih materijala (**izolacija**), odnosno kod uređaja s metalnim kućištem kod kojih su dijelovi pod naponom odvojeni još i dodatnom izolacijom (**dvostruka izolacija**), kao ni kod uređaja koji rade s naponom manjim od 50V (**sigurnosni napon**). Posljednja tehnička mjera zaštite koja se koristi na brodu je **galvansko odvajanje**, odnosno spajanje jednog uređaja na brodsku mrežu preko izolacijskog transformatora s prijenosnim omjerom 1:1, čime je onemogućeno zatvaranje strujnog kruga kroz čovjeka preko mase jer je sekundarna strana izolacijskog transformatora potpuno odvojena od elektroenergetskog sustava i trupa broda.

5.4. MJERE OSOBNE ZAŠTITE PRI RADU S ELEKTRIČNOM STRUJOM

Mjere osobne zaštite pri radu s električnom strujom odnose se na procedure i postupke kojih se treba pridržavati kako bi se smanjila opasnost da nas pogodi strujni udar. Treba:

1. nositi **cipele s gumenim potplatom** (onemogućen strujni udar preko stopala na pod)
2. nositi **suhi odjeću** (suha odjeća je dobar izolator pa onemogućen slučajan kontakt s dijelovima pod naponom)
3. koristiti **plastičnu zaštitnu kacigu** (onemogućuje kontakt s glavom i štiti od ozljeda u slučaju pada),
4. koristiti **gumene ili suhe kožne rukavice** kod rada pod naponom (kada se strujni krug ne može isključiti),
5. koristiti **gumenu prostirku** za klečanje, ležanje ili sjedenje, (ako pod nije električki izoliran).
6. **vezati se** kod rada na visini (i bezazleni strujni udar ili čak samo strah od njega može izazvati gubitak ravnoteže i smrtonosni pad)
7. koristiti **alat s izoliranim drškama** (s oznakom napona na koji su ispitane).
8. **isključiti strujni krug s napajanja** (uvijek kada je moguće)
9. **osigurati da ne može doći do hotimičnog uključenja** (izvaditi osigurač, zaključati sklopku ili prekidač, blokirati automatiku)
10. **postaviti znak upozorenja** na bitnim mjestima
11. **obavijestiti sve** involvirane što radite, a posebno one koji mogu daljinski hotimice uključiti uređaj na kojem radite.

12. **provjeriti prethodno provjerenim voltmetrom ili ispitivačem s dvije žice da li je uređaj pod naponom** prije prvog kontakta sa strujnim krugom (ne smije se koristiti kućni ispitivač napona – odvijač)
13. **prije pružanja pomoći unesrećenom isključiti napajanje** ako je moguće, a ako nije koristiti neki izolator (suhe rukavice, komad suhe odjeće, cipelu...) pri njegovom odvajanju od vodiča pod naponom

5.5. PROTUEKSPLOZIJSKA ELEKTRIČNA OPREMA

Ako je u nekom prostoru prisutna eksplozivna koncentracija gorivog plina i zraka, električna iskra može poslužiti kao upaljač koji će upaliti smjesu i tako izazvati eksploziju. Slab kontakt (labav, oksidiran, pregrijan) izaziva jako zagrijavanje (čak i taljenje materijala) i može izazvati požar ako se u blizini nađe gorivi materijal ali i eksploziju ako je prisutna eksplozivna smjesa. Pregrijavanje vodiča (unutar uređaja ili priključnih kabela) uslijed preopterećenja, kratkog spoja ili spoja s masom također može izazvati požar i eksploziju. Kako bi se spriječila eksplozija u zonama broda gdje postoji povećana opasnost od eksplozije, odnosno nastanka eksplozivne smjese zapaljivih tvari i zraka, moraju se koristiti protueksplozijske izvedbe električnih uređaja koje su jasno označene oznakom **Ex**. Protueksplozijska oprema koristi četiri osnovne metode za sprječavanje nastanka eksplozije: oklapanje ugroženog prostora (unutar uređaja) radi lokalizacije eksplozije, ograničenje energije uzročnika paljenja, ograničenje temperature uzročnika paljenja uz posebne mjere za smanjenje njegove pojave zbog greške i izoliranje uzročnika paljenja od eksplozivne smjese krutim tekućim ili plinovitim medijem. S obzirom na korištenu metodu, protueksplozijski uređaji se klasificiraju prema slijedećim oznakama:

Exd - neprodorni oklop (eng. flameproof enclosure). Kućište uređaja dozvoljava ulazak eksplozivne smjese ali je tako projektirano da izdrži eksploziju pa ne može doći do paljenja okolnog prostora. Uglavnom se koristi za svjetiljke, elektromotore i sklopke. Izlaz plamena je konstrukcijski spriječen širokim i preciznim spojevima vanjskih dijelova uređaja, tako da se plinovi nastali eksplozijom dovoljno ohlade do izlaska iz uređaja..

Exi – samo sigurnost (eng. intrinsic safety) Napajanje uređaja je izvedeno s ograničenjem napona i struje tako da niti u slučaju kratkog spoja nema dovoljno energije

za stvaranje električnog luka (iskre). Posebni zaštitni modul osigurava svaki strujni krug. Kod prorade zaštite modul se mora zamijeniti. Kabeli moraju biti jasno označeni i polagani odvojeno od drugih kabela s kojima se križaju pod pravim kutom. Uglavnom se koristi za komunikacije, signalizaciju, mjerenje i upravljanje. Exia je sigurnija izvedba koja dozvoljava dvije istovremene greške u sustavu, dok Exib dozvoljava samo jednu grešku.

Exe - povećana sigurnost (eng. increased safety)

Nema neke posebne zaštite od eksplozije već je izvedba takva da onemogućuje pojavu jakog zagrijavanja, iskrenja ili kratkog spoja, a kućište je otpornije na udarce i prodor tekućine ili stranih tijela. Uglavnom se koristi za elektromotore, svjetiljke i priključne kutije.

Exn – ne iskreća oprema (eng. non-sparking)

Slično kao Exd uređaji ne stvaraju iskre i nemaju jako zagrijanih površina, ali su zahtjevi općenito mnogo blaži. Uređaji jako nalikuju na standardne izvedbe.

Exp - nadtlak (eng. pressurisation) U uređaj se neprestano dovodi komprimirani plin (zrak ili dušik) tako da je tlak u njemu uvijek malo viši od tlaka u okolnom prostoru. Na taj način eksplozivna smjesa ne može ući u uređaj pa eventualno iskrenje ne može izazvati eksploziju. Uređaj se prije puštanja u pogon mora propuhati kako bi se odstranila eksplozivna smjesa koja se mogla nakupiti dok nije bilo nad tlaka. U slučaju gubitka tlaka aktivira se alarm, a uređaj se isključuje. Uglavnom se koristi za motore, svjetiljke i instrumente.

Exs - posebne mjere zaštite (eng. special protection) Posebno atestirana oprema za konkretnu situaciju.

Exq – punjeno prahom (eng. powder filled) Eksplozivna smjesa ne može ući jer je uređaj napunjen prahom.

Exo – punjeno uljem (eng. oil immersed) Eksplozivna smjesa ne može ući jer je uređaj napunjen uljem.

Prema stupnju opasnosti od nastanka eksplozije opasni prostori na plovnim objektima dijele se u tri zone:

Zona 0 - eksplozivna koncentracija je trajno ili dugotrajno prisutna (zatvoreni prostori spremišta, odjeljaka i prostorije sa pumpama goriva i tereta...). Smije se koristiti samo Exi i Exs oprema.

Zona 1 - velika vjerojatnost pojave eksplozivne koncentracije tijekom normalnih uvjeta eksploatacije (zatvoreni i poluzatvoreni prostori, na palubi tankera, prostori koji graniče s odjeljcima i spremištima, akumulatorska stanica ...). Pored Exi, Exs može se koristiti i Exp, Exd i Exe oprema.

Zona 2 - mala vjerojatnost kratkotrajne pojave eksplozivne koncentracije tijekom normalnih uvjeta eksploatacije (otvoreni prostori na palubi tankera na određenoj udaljenosti od zone 1). Dozvoljeno je korištenje i Exn, Exo i Exq opreme.

Temperатурne klase protueksplozijske opreme	
T1	do 450°C
T2	do 300°C
T3	do 200°C
T4	do 135°C
T5	do 100°C
T6	do 85°C

Grupe plinova protueksplozijske opreme	
Grupa I	Metan (najmanje opasan)
Grupa IIA	Amonijak, ugljični monoksid, propan, butan, metanol, etanol, aceton, ...)
Grupa IIB	Etilen, etilen oksid
Grupa IIC	Vodik (najopasniji)

Kod protueksplozijske izvedbe vrlo je važno znati i temperaturnu klasu uređaja. Ona definira najveću moguću temperaturu površine komponenti uređaja u ispravnom stanju ili kod kvara. Pretpostavljena temperatura okoline je 40°C. Temperaturna klasa (tablica 3) ne smije biti viša od temperature paljenja eksplozivne smjese koja se očekuje. Uređaji u protueksplozivnoj izvedbi moraju se označiti i prema grupi plinova za koje je dozvoljeno njihovo korištenje (tablica 4). Oprema s oznakom IIC može se koristiti i za grupe plinova IIA i IIB, a oprema s oznakom IIB i za grupu plinova IIA. Najopasniji je dakle vodik koji spada u grupu IIC a najmanje opasan metan (grupa I). Dakle i električna oprema atestirana i označena kao protueksplozijska (Ex) može izazvati eksploziju ako se koristi u prostorima u kojim se pojave opasniji (lakše zapaljivi) plinovi od onih za koje je projektirana.

5.6. KLIMATSKI UVJETI EKSPLOATACIJE BRODSKIH ELEKTRIČNIH UREĐAJA

Klimatski uvjeti u kojima se brod nalazi, konstantno se mijenjaju s obzirom na zonu plovidbe, godišnja doba i doba dana. To uzrokuje učestale promjene temperature zraka i mora, vlažnosti i saliniteta. Najnepovoljnijim uvjetima okoline, pogotovo što se tiče zaštite od vlage, izloženi su uređaji na otvorenim dijelovima palube. **Temperatura okoline** kojoj je izložena električna oprema na brodu može se kretati od -25°C do $+45^{\circ}\text{C}$ na palubi, a u nekim dijelovima strojarnice i do 60°C . Pri odabiru električne opreme u fazi projektiranja broda obično se računa sa temperaturom okoline od 45°C , a iznimno i 50°C ako je brod predviđen za stalnu plovidbu u tropskoj zoni. Kako je najveća dopuštena radna temperatura elektromotora određena **klasom izolacije**, na brodovima se u pravilu koriste motori s višim klasama izolacije, odnosno klase F (max. 155°C) i H (max. 180°C). Kod proračuna maksimalne radne temperature motora uzima se referentna vrijednost temperature okoline od 40°C .

Relativna vlažnost na palubi broda može iznositi i do 98% pri temperaturi od 25°C , a u unutrašnjosti broda od 40-70%, dok sadržaj morske soli može dostići razinu od $5\text{mg}/\text{m}^3$ [2]. Sol, vlaga i kondenzacija povećavaju koroziju metalnih dijelova električnih uređaja i slabljenje izolacije zbog stvaranja vodljivih slanih naslaga, te gljivica i pljesni na vlažnim dijelovima. Zbog kondenzacije vode na oplati, pregradama ali i unutar kućišta električnih uređaja može doći do kapanja i proboja električne izolacije.

Električni uređaji koje se nalaze u prostoru strojarnice, pogotovo u blizini dizel motora izloženi su agresivnoj atmosferi s povećanim udjelom **uljnih čestica** ($3\text{-}20\text{ mg}/\text{m}^3$) koje se skupa s prašinom i čađom talože na kućištima i izolaciji, te mogu izazvati negativne efekte kao što je pojava puzajućih struja i povećano zagrijavanje.

Palubni strojevi su izloženi zapljuskivanju i uranjanju u morsku vodu, a neki uređaji moraju trajno raditi pod vodom.

5.7. MEHANIČKA ZAŠTITE ELEKTRIČNIH UREĐAJA IP

Stupanj mehaničke zaštite od krutih predmeta i zaštite od vode označava se kraticom IP iza koje slijedi dvoznamenkasti broj. Prvi broj pokazuje mehaničku zaštitu a drugi zaštitu od vode. Veći broj znači viši stupanj zaštite. Tako se npr. oznaka IP 20 koristi za uređaje predviđene za rad u suhim stambenim prostorima, dok uređaji koji mogu raditi pod vodom (uronjive pumpe i sl.) moraju imati oznaku IP 68.

Zbog rada brodskih strojeva električni uređaji su izloženi i jakim vibracijama pa se moraju koristiti fleksibilni višezilni vodiči, kako ne bi došlo do njihovog pucanja zbog zamora materijala. Sve kontakte koji su realizirani pomoću vijčanih spojeva potrebno je na odgovarajući način osigurati od samoodvrtanja.

Prema pravilima registra, svi električni uređaji i komponente moraju biti dizajnirani tako da mogu besprijeckorno obavljati svoju funkciju kod trajnog bočnog nagiba od 15° i uzdužnog nagiba od 5°, odnosno kod bočnog ljuľanja $\pm 22.5^\circ$ i uzdužnog posrtanja $\pm 7.5^\circ$, koji se mogu javiti istodobno.

Stupanj mehaničke zaštite IP			
Prvi broj (mekanička zaštita)		Drugi broj (zaštita od vode)	
0	Bez zaštite	0	Bez zaštite
1	> 50 mm (ne ulazi šaka)	1	Od vertikalnog kapanja
2	> 8 mm (ne ulazi prst)	2	Od vertikalnog kapanja do nagiba od 15°
3	> 2,5 mm (ne ulaze alati)	3	Od prskanja do 60° od vertikale
4	> 1 mm (žica)	4	Od štrcanja iz svih smjerova
5	Zaštita od štetnog taloženja prašine	5	Od štrcanja u mlazu iz svih smjerova
6	Potpuna mehanička zaštita	6	Od zapljuskivanja mora i jakih mlazova
		7	Od uranjanja do 1m dubine do 30 minuta
		8	Moguć trajni rad pod vodom

5.8. STATIČKI ELEKTRICITET

Statički elektricitet je fizikalni fenomen koji se manifestira se kao razlika potencijala (napon) pojedinih dijelova opreme i ljudi prema trupu broda. Može iznositi i do 4000V), a najčešće se javlja na ljudima i njihovoj odjeći, svim el. izoliranim dijelovima brodske opreme (cijevi za pretakanje, metalni dijelovi položeni na nevodljivu podlogu, itd.) i isturenim dijelovima broda kada je u blizini nabijeni oblak. Najčešće nastaje kao posljedica triboelektričkog efekta, odnosno trenja između dvaju različitih materijala pri čemu jedan gubi, a drugi preuzima elektrone (npr. strujanjem zraka (vjetar), strujanjem tekućine u cijevima kod prekrcaja tereta, hodanjem po sintetičkoj podlozi, itd.) ali i uslijed elektrostatske influencije (npr. električki nabijeni oblak privlači suprotne naboje na brodski gromobran). Na brodu je posebno opasan atmosferski statički elektricitet zbog mogućeg udara groma, a u zonama opasnosti od eksplozije i statički elektricitet nastao trenjem zbog moguće pojave iskre pri izbijanju naboja i time zapaljenja eksplozivne smjese. Najznačajnije mjere zaštite od statičkog elektriciteta na brodovima su uzemljenje svih vodljivih dijelova, gromobranska instalacija i korištenje fleksibilnih cijevi za pretakanje s uzemljenim metalnim opletom.

5.9. GROMOBRAN

Gromobranska instalacija se sastoji od hvataljke groma, odvodnog voda i uzemljenja. Hvataljka groma je zašiljena metalna šipka, minimalno promjera 12mm, zaštićena od korozije i povezana s odvodnim vodom. Postavlja se na svaki jarbol tako da ga nadvisuje za najmanje 30 cm. Odvodni vod je napravljen od bakrene ili željezne trake minimalnog presjeka 70mm² (Cu) odnosno 100mm² (Fe), također zaštićene od korozije, posebno na spojevima koji su vareni ili stegnuti vijcima s minimalnom dodirnom površinom od 10 mm². Odvodni vod se polaže isključivo izvana sa što manje promjena smjera i što većim polumjerima zakrivljenosti lukova. Ne smije se polagati u zatvorenim prostorima i zoama opasnosti od eksplozije. Kao uzemljivač se na metalnom brodu koristi

dio trupa koji je pod vodom, a na brodovima s nevodljivom oplatom metalna ploča pričvršćena na podvodni dio trupa. Kada je brod u doku ili na navozu gromobranska se instalacija obavezno mora spojiti s kopnenim uzemljenjem ili uzemljenjem plovnog doka. Gromobran izbija okolnu atmosferu i time uglavnom sprječava pojavu groma. Ukoliko do udara groma ipak dođe, mora biti sposoban njegovu energiju sigurno provesti do uzemljivača. **Štićena zona** gromobrana je oblika stošca s hvataljkom na vrhu dok je plašt pod kutem od 45° od vertikale.

5.10. ELEKTROMAGNETSKA KOMPATIBILNOST

Izjava o elektromagnetskoj kompatibilnosti je potvrda da uređaj zadovoljava zadane propise, na način da nema štetnog utjecaja na druge uređaje, odnosno da i sam nije osjetljiv na elektromagnetske interferencije unutar propisanih granica. Elektromagnetska interferencija je svaka elektromagnetska smetnja koja može poremetiti rad električnih i elektroničkih uređaja. Najčešći izvori elektromagnetskih smetnji su: iskrenja (istosmjerni i kolektorski elektromotori, sklopke, ...), atmosferska pražnjenja (gromovi), nagle promjene napona i struje (ukapčanje i iskapčanje uređaja), uređaji energetske elektronike (harmoničko izobličenje struje i napona, prenaponi i komutacijski propadi napona) i odašiljači (radio stanica, mobilni radio uređaji, ...)

Elektromagnetske smetnje mogu se širiti vodičima (mrežom) i zračenjem (radijacijom). Kako bi se spriječile odnosno u čim većoj mjeri smanjile, koriste se slijedeće metode: međusobno udaljšavanje uređaja (jakost elektromagnetskog zračenja jako pada s udaljšenošću od izvora, npr. signalni kablovi se nikada ne polažu uz energetske), oklapanje uređaja (metalni oklop, npr. kućište uređaja ili koaksijalni oplet kabela ne propuštaju elektromagnetsko zračenje), prigušivanje smetnji (primjerenom izvedbom uređaja, npr. korištenjem transformatora s velikim rasipnim reaktancijama ili prigušnice smanjuje se emisija viših harmonika i komutacijskih propada kao rezultat rada tiristorskih pretvarača) i filtriranje smetnji (npr. pasivni kanalni i niskopropusni filtri učinkovito smanjuju više harmonike u mreži).

6. PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE NA BRODU

6.1. IZVORI ELEKTRIČNE ENERGIJE NA BRODU

Na brodu se koriste tri vrste izvora električne energije:

- generatori
- akumulatorske baterije
- galvanski članci

Osnovni izvori električne energije na brodu su generatori. Svaki brod mora imati barem dva glavna generatora (uglavnom dizel-generatori, a rjeđe turbo-generatori pogonjeni parnim ili plinskim turbinama) i generator za nužnost. Neobavezno se ugrađuju generatori za povećanje energetske učinkovitosti: osovinski generator (pogonjen glavnim strojem), parni turbo-generator koji koristi paru iz KIP-a i lučki generator (manji dizel-agregat za rad kada brod miruje). Na današnjim brodovima se gotovo isključivo koriste sinkroni samouzbudni bezkontaktni generatori. Prema vrsti pogonskog stroja dijelimo ih na: dizel generatore, turbo generatore i osovinske generatore. Snage brodskih generatora kreću se od nekoliko stotina kVA, pa sve do 18000 kVA na velikim putničkim brodovima koji su opremljeni dizel električnom propulzijom. Izbor vrste generatora i broja pari polova određuje se prema vrsti i broju okretaja pogonskog stroja.

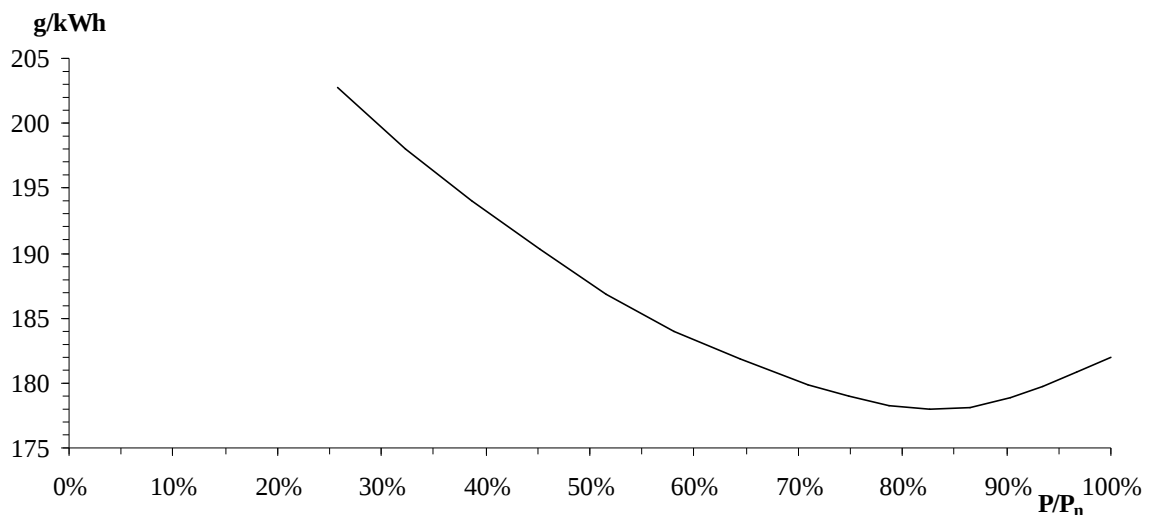
Akumulatorske baterije se koriste u akumulatorskoj stanici za napajanje sigurnosne mreže 24V na koju su priključeni pomoćna rasvjeta, automatika, komunikacije, alarmni sustav. Na velikim putničkim brodovima akumulatori mogu u nuždi napajati istosmjerne mreže 110 ili 220V. Posebne akumulatorske baterije koriste se za pokretanje dizel-motora generatora za nužnost.

Galvanski članci se koriste za napajanje ručnih prijenosnih uređaja (mjerni instrumenti, ručna radio stanica, baterijske svjetiljke, itd.).

6.2. DIZEL-GENERATORI

Sinkroni generator pogonjen dizelskim motorom je najviše zastupljen izvor energije na brodovima. Brodski generatori se uvijek spajaju izravno na pomoćne motore (bez upotrebe reduktora) pa se za njihov pogon koriste brzohodni ili srednjohodni dizelski motori. Najznačajnije prednosti dizel motora, kao pogonskog stroja generatora, su trenutna

spremnost na rad, mogućnost kvalitetne regulacije brzine i visoki stupanj korisnosti. Nedostaci su njihanje energije i pojava torzionih vibracija kao posljedice elastičnosti osovine, te neravnomjerni moment, koji je tim veći što je manji broj cilindara motora. Elektromehaničke oscilacije uzrokovane navedenim nedostacima ublažuju se korištenjem generatora s prigušnim namotom (prigušnim kavezom). Potrebna brzina vrtnje dizel motora određena je frekvencijom f (60Hz) i brojem pari polova korištenog generatora p



prema formuli za sinkronu brzinu $n_s = 60 f/p$.

Moderni dizel motori iskorištavaju oko 40% energije sadržane u gorivu, što je vrlo velika korisnost u usporedbi s ostalim toplinskim strojevima. Efikasnost dizel motora ovisi o opterećenju i vrlo brzo opada kada ono padne ispod 50% nazivne snage, što se može vidjeti iz dijagrama specifične potrošnje prikazanog na slici. Pri malom opterećenju izgaranje smjese nije potpuno pa dolazi do stvaranja čađe, sumpornih (SO_x) i dušičnih (NO_x) spojeva, što za posljedicu ima povećane emisije štetnih plinova i češće održavanje. Zbog toga je izuzetno važno optimizirati sustav proizvodnje električne energije na način da generatori, bilo samostalno ili u paraleli, u svim fazama eksploatacije broda, čim više rade u području optimalne iskoristivosti, tj. sa 60-90 % opterećenja. Optimizacija se radi pri projektiranju kod izrade bilance snage i lakše se postiže s većim brojem generatora manjih snaga, ali treba uzeti u obzir i povećane troškove instalacije i održavanja, veći broj nezavisnih sustava regulacije te činjenicu da dizel-generatori manjih snaga imaju i manji stupanj korisnosti. Obično se na trgovačkim brodovima kao optimalan broj generatora uzima 2-4, dok na brodovima sa električnom propulzijom taj broj može biti i dvostruko veći (4-6).

6.3. OSOVINSKI GENERATORI

Osovinski generatori (Shaft generator, PTO - Power take off) su generatori koji nemaju vlastiti pogonski stroj već su privješeni na glavni porivni stroj. Smisao ugradnje osovinskog generatora je smanjenje troškova proizvodnje električne energije na brodu. U početku, kada su gotovo svi brodski pomoćni motori koristili dizelsko gorivo (DO) najveća se ušteda ostvarivala upravo na razlici u cijeni dizelskog i teškog goriva (HFO). Pojavom i danas sustavnim korištenjem pomoćnih motora na teško gorivo, brodari su uglavnom prestali koristiti osovinske generatore, zanemarujući njihove ostale učinke na smanjenje troškova električne energije a to su višestruko smanjenje troškova održavanja pomoćnih motora zbog neusporedivo manjeg godišnjeg broja sati rada (koriste se samo kad osovinski generator nije u funkciji) i veći stupanj korisnosti glavnog porivnog stroja od stupnja korisnosti pomoćnih motora. Kao prednosti osovinskog generatora treba svakako dodati i mogućnost dobivanja vrlo velike električne snage bez ugradnje pogonskih strojeva (dodatnih pomoćnih motora), posebice kad nema potrebe za porivom pa se teoretski cijela snaga glavnog porivnog motora može pretvoriti u električnu snagu za pogon npr. rashladnih kompresora ili pumpi tereta. Tako se dobiva lakša i jeftinija električna centrala.

Kod srednjehodnih porivnih motora osovinski se generatori ugrađuju direktno na osovinski vod, na reduktor propulzije ili direktno na stražnji dio motora, a kod sporohodnih na stražnji dio motora preko multiplikatora ("reduktora" za povećanje broja okretaja) ili rjeđe direktno. Problem je što generatori koji rade na malim okretajima moraju imati veliki promjer kako bi se postigla dovoljno velika obodna brzina za induciranje napona i mogao smjestiti veliki broj polova potreban za postizanje frekvencije od 60Hz. Npr. osovinski generator koji bi se direktno spojio na sporohodni porivni dizel motor koji radi na 120 o/min morao bi imati 60 polova. Takvi sporohodni generatori su skupi i glomazni pa se češće koriste varijante s bržim i manjim generatorima koje stoga vrlo često zahtijevaju upotrebu multiplikatora.

Osovinski generatori se većinom koriste samo u navigaciji, ali na nekim brodovima sa specifičnim električnim sustavima i energetskim potrebama i za manevar, prekrcaj, naglo hlađenje tereta i sl. Dimenzionirani su tako da im je snaga dovoljna da u zadanim režimima eksploatacije samostalno pokriju svu predviđenu potrošnju pa se ne prakticira paralelni rad s dizel-generatorima. Teoretski gledano, raspoloživost poriva broda veća je kada su esencijalna trošila (pumpe nužne za rad glavnog porivnog stroja) napajana iz

osovinskog generatora, jer je vjerojatnost otkaza glavnog porivnog stroja manja od vjerojatnosti otkaza glavnog porivnog stroja ili pomoćnog motora. Ipak, u specifičnim uvjetima plovidbe (teško more, moguća potreba nagle promjene kursa ili poriva) kada postoji opasnost od povratnog djelovanja brodskog vijka na brzinu vrtnje glavnog porivnog stroja, a time i na frekvenciju osovinskog generatora, odnosno brodske mreže, opasnost od blackouta a time i gubitka poriva je općenito veća.

Osnovni problem osovinskih generatora je održavanje konstantne frekvencije brodske mreže kod različite veličine poriva, jer se (kod direktnog spoja na glavni porivni spoj) promjenom broja okretaja brodskog vijka mijenja i brzina osovinskog generatora, a time i frekvencija generiranog napona. Postoje četiri rješenja, odnosno četiri vrste osovinskih generatora:

- Osovinski generator na brodu s brodskim vijkom s prekretnim krilima (CPP),
- Osovinski generator spojen na glavni porivni motor preko varijatora (Con-Speed, Rank) na brodu s brodskim vijkom s fiksnim krilima (FPP),
- Osovinski generator spojen na brodsku mrežu preko pretvarača frekvencije na brodu s brodskim vijkom s fiksnim krilima (FPP) i
- Osovinski generator s asinkronim kolutnim generatorom na brodu s brodskim vijkom s fiksnim krilima (FPP) koja se više ne koristi

6.4. OSOVINSKI GENERATOR NA BRODU S BRODSKIM VIJKOM S PREKRETNIM KRILIMA (CPP)

Ovo je najstarija izvedba osovinskog generatora za izmjeničnu struju. Primjenjuje se na brodovima na kojim se zbog postizanja boljih maritivnih karakteristika i smanjenja potrošnje goriva koriste brodski vijci s prekretnim krilima (CPP). Sinkroni generator je spojen direktno ili preko reduktora, odnosno multiplikatora, na osovinu glavnog porivnog stroja. Kada se odabere režim rada s osovinskim generatorom (SHAFT GENERATOR MODE) regulator broja okretaja glavnog porivnog motora se blokira na nazivnim okretajima i održava ih konstantnim, pa je prema tome konstantna i frekvencija napona generiranog na osovinskom generatoru. Tijekom rada osovinskog generatora, poriv se mijenja isključivo promjenom koraka brodskog vijka. Moguć je i preket (vožnja unazad) postavljanjem negativnog koraka brodskog vijka, ali se manevar s osovinskim generatorom iz razloga sigurnosti ne prakticira (u slučaju manevra naglog zaustavljanja dolazi do velikih oscilacija frekvencije i raspada elektroenergetskog sustava). Kod teškog mora, kada postoji opasnost zbog izranjanja brodskog vijka, osovinski se generator mora isključiti a okretaji motora smanjiti. Porivni motor se naime u modu osovinskog generatora konstantno vrti gotovo maksimalnim brojem okretaja, pa bi pri izranjanju krila brodskog vijka došlo do naglog smanjenja otpora, a time i naglog povećanja brzine, što regulator broja okretaja ne bi mogao pravovremeno kompenzirati smanjenjem goriva, pa bi brzina prešla limit na kojem prorađuje zaštita od prevelike brzine (OVER SPEED) koja bi u tom slučaju bez odlaganja isključila motor. Stao bi naravno i osovinski generator, pa bi se brod našao na teškom moru bez poriva i električne energije (blackout).

Kako CPP omogućuje preket poriva jednostavnom promjenom koraka vijka u negativnu stranu, što je i najefikasniji način za prelazak u vožnju krmom, često je korištena izvedba s razdvajanjem glavne sabirnice na način da u manevru osovinski generator napaja samo pramčani porivnik, kojemu nagle oscilacije frekvencije kod promjene opterećenja glavnog porivnog stroja nisu od velikog značaja, dok sva ostala trošila, odnosno brodsku mrežu, napajaju dizelgeneratori. Na taj način je na brodu smanjen ukupni broj dizelgeneratora.

6.5. OSOVINSKI GENERATOR SPOJEN PREKO VARIJATORA (CON-SPEED)

Varijator (Con Speed, Rank) je uređaj koji i kod promjene brzine na njegovoj ulaznoj osovini zadržava konstantan broj okretaja na izlaznoj osovini na koju se spaja osovinski generator. Ako je osovinski generator spojen preko varijatora moguće je s njime ploviti u granicama od 70-100% nazivne brzine glavnog porivnog stroja. Danas se koriste varijatori koji rade na mehaničko-hidrauličkim principima. Problem varijatora su relativno česti kvarovi koji su u pravilu posljedica nestručnog održavanja.

6.6. OSOVINSKI GENERATOR SA STATIČKIM PRETVARAČEM FREKVENCije

Ovo je najsuvremenija izvedba osovinskog generatora. Generator je spojen na osovinu glavnog stroja direktno ili preko reduktora (multiplikatora) pa se promjenom broja okretaja broskog vijka (FPP) mijenja i frekvencija generatora. Generator se električki spaja na mrežu preko statičkog pretvarača frekvencije koji na izlazu održava potpuno konstantnu frekvenciju i napon. Kako je riječ o o elektroničkom uređaju, brzina promjene broja okretaja glavnog porivnog stroja nema nikakvog utjecaja na stabilnost napona i frekvencije mreže. Najčešće korišten pretvarač frekvencije je sinkrokonverter koji zahtijeva ugradnju sinkronog kompenzatora. To je sinkroni stroj koji nema pogona ni tereta. Radi kao sinkroni motor u preuzbuđenom stanju, a upućuje se pomoću malog asinkronog motora (pony motor). Sinkroni kompenzator ima trostruku ulogu: 1) omogućuje komutaciju (gašenje)

tiristora sinkrokonvertera (sinkrokonverter može raditi samo ako su mu na obje strane (osovinskog generatora i mreže) priključeni sinkroni strojevi, 2) osigurava jalovu snagu za potrošnju (sinkrokonverter struju najprije ispravi a zatim je pretvara u izmjeničnu struju stabilne frekvencije pa se zbog istosmjernog međukruga jalova energija ne može razmijenjivati između generatora i potrošnje) i 3) osigurava dovoljno visoku trajnu struju kratkog spoja za selektivnu proradu zaštita (sinkrokonverter nema mogućnosti velikog preopterećenja pa ne može dati dovoljno veliku struju kratkog spoja. Osnovni problem Sinkrokonvertera su njegove nesinusoidalne (pravokutne) struje na mrežnoj i generatorskoj strani što znači da je mreža zagađena jakim višim harmonicima. Najnovija izvedba osovinskog generatora koristi širinsko-impulsno modulirani pretvarač frekvencije s aktivnim ispravljačem koji ima približno sinusoidalne struje i ne treba sinkroni kompenzator pa je održavanje i rukovanje mnogo jednostavnije.

6.7. GENERATOR ZA NUŽNOST

Generator za nužnost je uvijek pogonjen dizel motorom. Nalazi se u nadgrađu broda uz ploču za nužnost i ima potpuno nezavisne prateće sustave (napajanje gorivo, hlađenje, pokretanje). Generator za nuždu štiti se samo od kratkog spoja. Preopterećenje ne isključuje prekidač već samo daje alarm. Uključuje se automatski kada nestane napona na glavnoj razvodnoj ploči (uvijek mora biti postavljen na automatsko upravljanje). Uz osnovni automatski sustav pokretanja koji koristi elektropokretač, pneumatski motor ili startanje pomoću zraka ima osigurano i rezervno ručno pokretanje. Najznačajnija trošila koja napaja generator za nužnost su:

- kormilarski uređaj
- rasvjeta za nuždu
- protupožerne pumpe
- protupožarni sustav
- pozicijska, navigacijska i signalna svjetla
- radio i navigacijska oprema
- interne komunikacije
- automatika
- alarmni sustav
- pomoćne pumpe
- pomoćni kompresor

• ...

6.8. LUČKI GENERATOR

Kada brod dulje vrijeme miruje (ne plovi niti prekrcava teret) potrošnja električne energije je relativno mala – premala za ekonomičan rad glavnog generatora koji bi morao raditi s manje od 25% nazivne snage, a to znači s većom specifičnom potrošnjom goriva i nepotpunim sagorijevanjem. Nekad su se dok je brod često danima čekao na prekrcaj koristili lučki generatori kojima je snaga bila prilagođena takvoj smanjenoj potrošnji, a danas njihovu ulogu može preuzeti odgovarajuće dimenzioniran generator za nužnost.

6.9. NAPAJANJE S KOPNA

Kada se brod nalazi u doku ne mogu mu raditi glavni generatori koji se posredno hlade morem pa je najjednostavnije rješenje priključiti ga na napajanje s kopna. Postupak je sljedeći:

1. Isključiti postepeno svu potrošnju
2. Isključiti automatiku centrale (prebaciti na ručno)
3. Isključiti generatorski prekidač
4. Onemogućiti start dizel-generatora; dovući i priključiti kabel s kopna na za to predviđeno mjesto (glavna razvodna ploča, ploča za nužnost ili priključna kutija na palubi)
5. Provjeriti frekvenciju, napon i redoslijed faza
6. Uključiti prekidač za napajanje s kopna.

6.10. PARALELNI RAD GENERATORA

Prema propisima brod mora imati toliko generatora da pri ispadu iz pogona bilo kojeg od njih preostala snaga (snaga ispravnih generatora) bude dovoljna za sigurnu plovidbu. Paralelni rad generatora primjenjuje se zbog prilagođavanja proizvodnje električne energije, preciznije broja priključenih generatora, trenutnim potrebama potrošnje u različitim fazama eksploatacije broda. Potrošnja električne energije se naime jako razlikuje zavisno od toga da li je brod u plovidbi, manevrira, prekrcava teret ili je na sidru, a na brodsku mrežu treba u svakom trenutku biti priključeno dovoljno generatora za podmirivanje trenutčne potrošnje. Treba ipak napomenuti da se tijekom manevra u paralelni rad uključuje više generatora nego što je prema trenutnoj, čak i očekivanoj, potrošnji potrebno, kako bi se povećala sigurnost napajanja električnom energijom. Vezano za očekivanu potrošnju, u manevru mora biti priključeno dovoljno generatora za uključivanje i nesmetan rad pramčanog propelera, koji je izuzetno veliko trošilo, kako bi ga se po potrebi u svakom trenutku moglo uključiti. Isto tako, uključivanjem jednog generatora više od potrebnog broja, povećava se raspoloživost elektroenergetskog sustava tako da bez prekida u napajanju može proizvoditi dovoljno energije čak i u slučaju iznenadnog ispada iz pogona jednog od generatora. To se međutim ne prakticira u ostalim fazama eksploatacije jer preveliki broj priključenih generatora u odnosu na trenutnu potrošnju znači da su njihovi pogonski strojevi (uglavnom dizel motori) podopterećeni, a tada im je specifična potrošnja goriva primjetno veća. Također, zbog nepotpunog sagorijevanja dolazi do prljanja što skraćuje servisne intervale i tako povećava troškove održavanja. Nije dakle uputno da dizel-generatori dulje vrijeme rade s manje od 25-30% nazivnog opterećenja dizel motora [kW]. Korištenjem većeg broja generatora koji se po potrebi uključuju na mrežu u paralelni rad postiže se dakle rad pogonskih strojeva u području većih opterećenja i time bolje iskorištenje goriva. Problematika paralelnog rada obuhvaća:

- sinkronizaciju
- raspodjelu djelatne snage [kW]
- raspodjelu jalove snage [kVAr]
- zaštitu od povratne snage

6.11. SINKRONIZACIJA

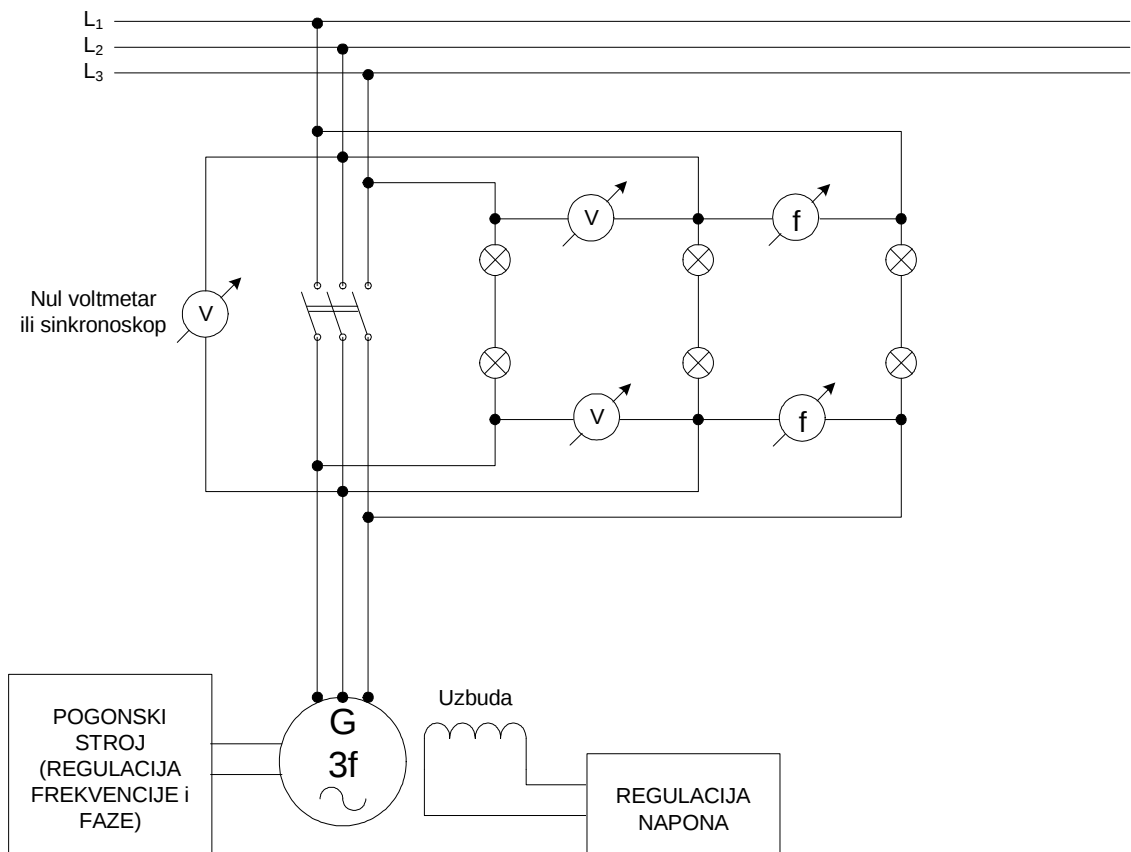
Sinkronizacija je postupak uključivanja sinkronog generatora u paralelni rad s mrežom pri čemu se, nakon što su ispunjeni svi nužni uvjeti uključuje generatorski prekidač. Svako isključivanje ili uključivanje većih trošila tijekom sinkronizacije utječe na ravnotežu sustava i produljuje vrijeme sinkronizacije (npr. vrlo je teško, a često puta i nemoguće napraviti sinkronizaciju dok rade teretna vitla). Uvjeti koje je potrebno zadovoljiti prije sinkronizacije generatora na brodsku mrežu su:

- isti redoslijed faza generatora i brodske mreže
- jednak iznos napona generatora i brodske mreže
- približno jednake frekvencije napona generatora i brodske mreže
- istofaznost napona generatora i brodske mreže

Isti redoslijed faza svih ugrađenih generatora ostvaruje se i provjerava u brodogradilištu prilikom gradnje broda. Podešavanje induciranog napona generatora prije sinkronizacije na vrijednost jednaku naponu mreže vrši se regulacijom struje uzbude preko automatskog regulatora napona, dok se približna jednakost frekvencije i istofaznost postižu regulacijom goriva preko regulatora broja okretaja stroja koji pogoni generator (na brodu je to najčešće dizel motor). Frekvencije ne smiju biti jednake jer bi tada stalno postojao fazni pomak među naponima i ne bi se moglo ispuniti uvjet istofaznosti. Generator koji se sinkronizira na mrežu treba se vrtjeti malo brže od generatora koji su već priključeni kako bi nakon uključivanja prekidača odmah preuzeo malo opterećenja. U suprotnom bi povukao snagu iz mreže i počeo raditi kao motor te dodatno opteretio ostale generatore.

Tipična shema spoja za sinkronizaciju generatora prikazana je na slici. Sinkronoskop i sinkronizacijske lampe služe za određivanje trenutka kada su napon generatora kojeg sinkroniziramo i napon mreže u fazi tj. kada između njih nema faznog pomaka (istofaznost), pa se može uključiti generatorski prekidač, odnosno izvršiti sinkronizacija. Sinkronoskop ujedno pokazuje i da li se generator vrti brže (desni smjer vrtnje na sinkronoskopu) ili sporije od generatora koji su na mreži (lijevi smjer vrtnje na sinkronoskopu). Nekad su se za provjeru uvjeta sinkronizacije koristile sinkronizacijske lampe u tamnom spoju, dok se danas to radi isključivo korištenjem sinkronoskopa. Lampe u tamnom spoju spojene su, po dvije u seriju za svaku fazu, paralelno kontaktima generatorskog prekidača, kako je to prikazano u shemi na slici, i sve su ugašene kada je generator u fazi s mrežom. Jednakost napona i frekvencije provjerava se dvostrukim voltmetrom, odnosno dvostrukim mjerilom frekvencije. Danas su gotovo svi brodovi

opremljeni uređajima za automatsku sinkronizaciju, tako da se ručna sinkronizacija radi samo u slučaju kvara na automatici. Ako se generatorski prekidač uključi u trenutku kada navedeni uvjeti nisu dovoljno precizno ispunjeni, dolazi do krive sinkronizacije koja potjera veliku struju izjednačenja i može imati izuzetno ozbiljne posljedice: Gotovo sigurno će doći do blackouta, a zbog velikih sila među namotima u najgorem slučaju može doći do njihovog trganja, blokiranja osovine i uništenja generatora i pogonskog stroja.



Principna shema sinkronizacijskog sklopa

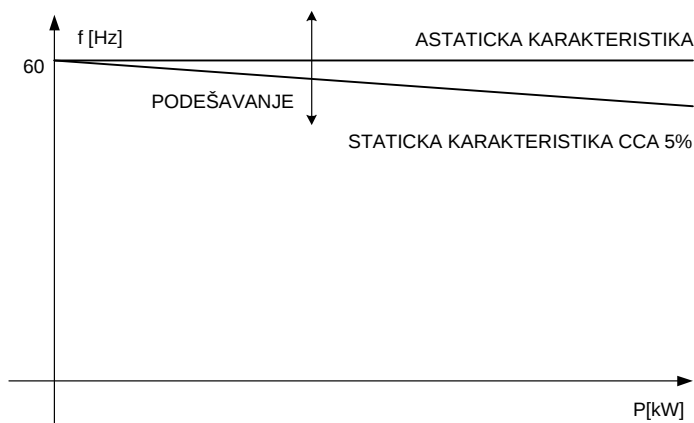
6.12. RASPODJELA DJELATNE SNAGE

Raspodjela djelatne snage (kW) je nedjeljiva od regulacije frekvencije i povezana je isključivo s pogonskim strojevima generatora, odnosno njihovim regulatorima broja okretaja. Nakon što je drugi generator sinkroniziran na brodsku mrežu koju je do tada napajao prvi generator, on i dalje radi sa zanemarivim opterećenjem. Da bi preuzeo dio

opterećenja od prvog generatora s kojim je sada elastično povezan preko tzv. električne osovine (oba se stroja zbog paralelnog spoja i prema tome istog napona i frekvencije vrte identičnom brzinom) treba pogonskom stroju drugog generatora povećati a prvog smanjiti dovod goriva. Na taj način uz konstantnu brzinu vrtnje, odnosno frekvenciju, dolazi do prebacivanja dijela snage s prvog generatora na drugi. To se međutim ne radi direktnim pomicanjem ručice goriva već preko regulatora broja okretaja spomenutih strojeva.

6.13. KARAKTERISTIKE REGULACIJE FREKVENCIJE $f(P)$

Regulator broja okretaja ima mogućnost podešavanja nagiba (speed droop) karakteristike opterećenja koja pokazuje ovisnost frekvencije (broja okretaja) o opterećenju (djelatnoj snazi u kW) pogonskog stroja (dizel motora). Postoje dvije vrste podešenja: Karakteristika kod koje nema propada frekvencije s povećanjem opterećenja naziva se **astatička**, dok se karakteristika s nagibom naziva **statičkom**. Statička se karakteristika u

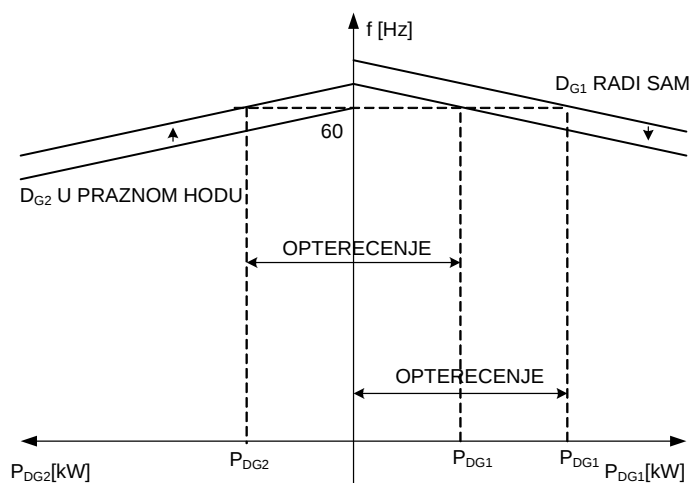


pravilu podešava tako da frekvencija kod punog opterećenja u odnosu na prazni hod (bez opterećenja) padne za 5% (3Hz) i tako ostane ukoliko se ne korigira ručno pomoću komande LOW/RISE u generatorskom polju ili polju sinkronizacije glavne rasklopne

ploče, čime se karakteristike $f(P)$ translacija dolje-gore. Treba naglasiti da, ako je uključena, automatska regulacija frekvencije (frequency control) u svojstvu nadređene automatike sama translacija karakteristike $f(P)$ i tako održava konstantnu frekvenciju kod različitih djelatnih opterećenja [kW], pa se propad frekvencije u slučaju statičke karakteristike, kod npr. povećanja potrošnje, može uočiti samo neposredno nakon uključivanja novog trošila, prije nego što ga automatska regulacija frekvencije uspije korigirati podizanjem karakteristike. Kod dizel-generatora s astatičkom karakteristikom također dolazi do propada frekvencije ali ga njegov regulator broja okretaja sam

kompenzira, mnogo brže od nadređene regulacije frekvencije. Ako se koriste moderni elektronički regulatori broja okretaja, vrijeme vraćanja frekvencije na 60Hz će u oba slučaja biti jednako. Osovinski generator u kombinaciji s brodskim vijkom s prekretnim krilima (CPP) ima astatičku karakteristiku, jer je snaga glavnog porivnog stroja koji ga pogoni mnogo veća od snage generatora tako da porivni stroj bez obzira na podešenje njegovog regulatora broja okretaja, ne osjeća ove, za njega premale, promjene opterećenja.

6.14. RASPODJELA DJELATNE SNAGE [kW] IZMEĐU DVA DIZELGENERATORA

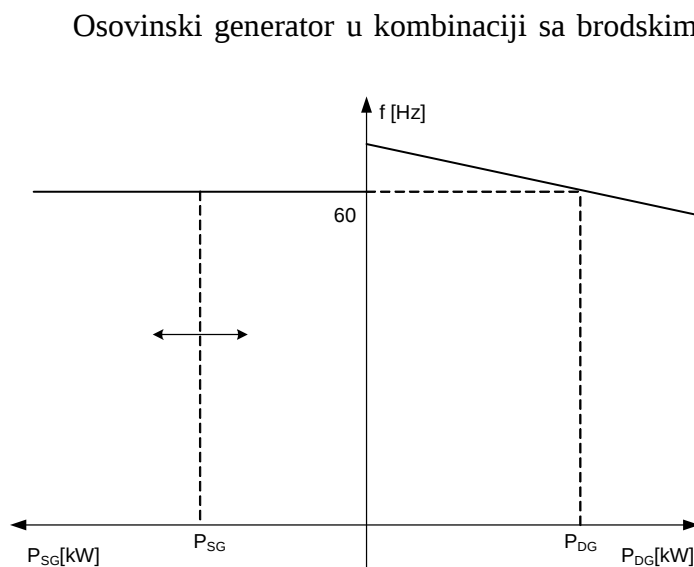


Na slici je prikazana raspodjela djelatnog opterećenja u slučaju dva jednaka dizelgeneratora s jednako podešenim statičkim karakteristikama regulacije. Prije i neposredno nakon sinkronizacije svo opterećenje je držao DG1. Nakon sinkronizacije novo-

priključeni generator DG2 radi bez opterećenja. Da bi preuzeo dio opterećenja komandom RISE je automatskom regulatoru broja okretaja njegovog dizel motora podignuta karakteristika $f(P)$ uz adekvatno spuštanje iste na DG1 komandom LOW kako bi se zadržala konstantna frekvencija. Ukupno opterećenje (potrošnja trošila priključenih na brodsku mrežu) koje se nije promijenilo sada je ravnomjerno raspoređeno između DG1 i DG2. Kod uključanja ili isključanja nekog (većeg) trošila dolazi do brze raspodjele opterećenja koja ovisi o nagibu karakteristika opterećenja. Ako su oni jednaki, oba će dizel generatora preuzeti jednaki dio novog opterećenja, neovisno o tome da li je postojeće opterećenje bilo ravnomjerno raspoređeno, kao na slici, ili ne. Iako postoje i drugačije opcije, najčešće se nadređena automatika (LOAD SHARING) postavlja na jednako opterećenje svih generatora u paralelnom radu (EQUAL LOAD) jer je u tom slučaju trenutna opteretivost električne centrale uključivanjem novog potrošača najveća. U

suprotnom bi se moglo dogoditi da generator koji nosi veće opterećenje, uzevši u trenutku uključivanja novog trošila jednaki dio snage dođe u preopterećenje dok bi drugi generator još imao rezerve snage.

6.15. RASPODJELA DJELATNE SNAGE [kW] IZMEĐU DIZELGENERATORA I OSOVINSKOG GENERATORA

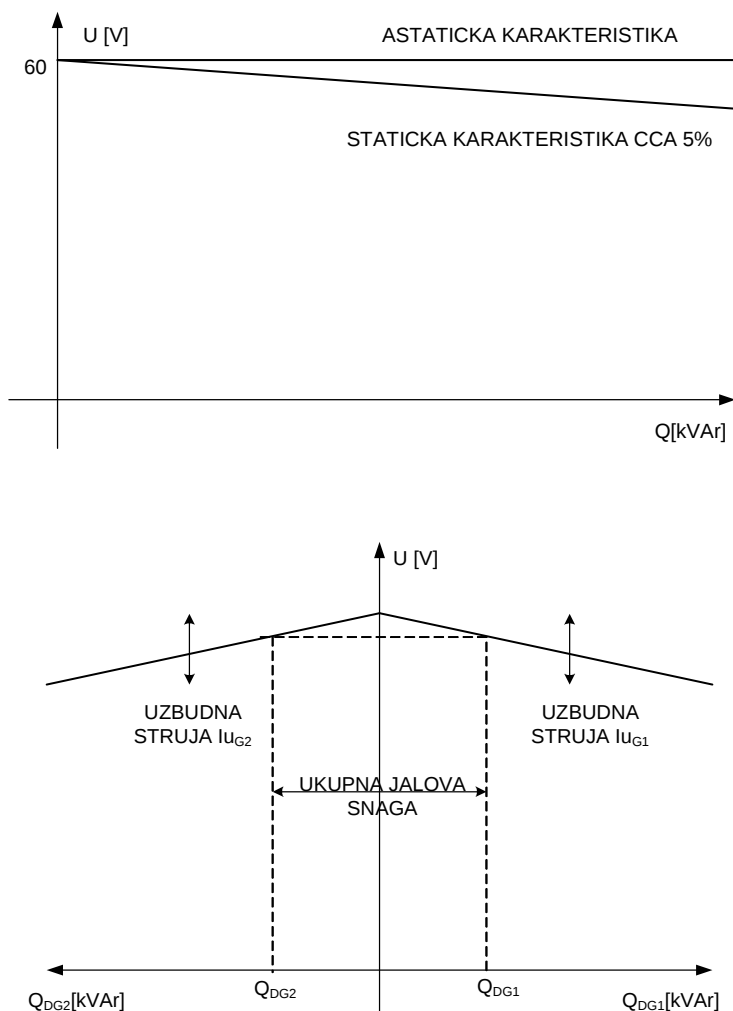


ima astatičku karakteristiku jer je snaga glavnog porivnog stroja koji ga pogoni mnogo veća od snage generatora tako da porivni stroj ne osjeća tako male promjene opterećenja. Stoga se nakon sinkronizacije raspodjela opterećenja vrši samo spuštanjem

karakteristike dizelgeneratora preko njegovog regulatora broja okretaja (komanda LOW). Regulacija frekvencije se vrši direktno i isključivo preko regulatora broja okretaja glavnog porivnog stroja. Paralelni rad se prakticira samo tijekom zamjene generatora (s osovinskog na dizel i obratno), jer za njime u nema potrebe budući da je osovinski generator dovoljno velik da samostalno podmiruje kompletnu potrošnju električne energije na brodu. Neki sustavi omogućuju trajni paralelni rad osovinskog i dizel generatora, koji međutim nije preporučljiv jer zbog naglog opterećenja glavnog motora (promjena koraka ili izranjanje broskog vijka, veći zakret kormila) može doći do pada ili porasta njegovog broja okretaja, a time i naglog prebacivanja snage između osovinskog i dizel generatora, što može prouzročiti isključivanje dizel-generatora i osovinskog generatora (blackout) zbog povratne snage i/ili preopterećenja.

6.16. RASPODJELA JALOVE SNAGE [kVAr]

Generatori, pored djelatne snage, moraju osigurati i nesmetanu razmjenu jalove snage. Raspodjela jalove snage (kVAr) je nedjeljiva od regulacije napona i povezana je



isključivo s generatorima, a posebice njihovom strujom uzbude, reguliranom putem automatskog regulatora napona (AVR). Povećanjem uzbudne struje generator preuzima više jalove snage. Slično kao i regulator broja okretaja i automatski regulator napona može imati statičku ili astatičku karakteristiku $U(Q)$. U paralelnom radu je obvezatna statička karakteristika, dok se u otočnom radu (samo jedan generator na mreži) ponekad, zbog veće stabilnosti napona, prakticira prelazak na astatičku karakteristiku.

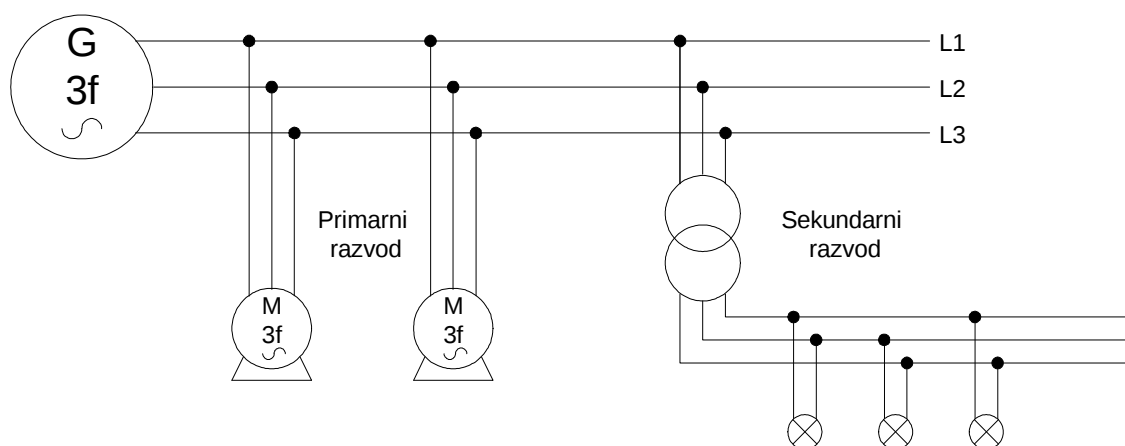
Prelazak je iniciran putem

pomoćnih kontakata generatorskih prekidača (kada je samo jedan prekidač uključen). U slučaju neravnomjerne raspodjele jalove snage, može se dogoditi da, iako su pogonski strojevi (dizel motori) jednako opterećeni (djelatna snaga [kW] na oba generatora su jednaki), jedan od generatora bude više opterećen ili čak preopterećen (prevelika struja na A-metru) jer je na sebe preuzeo veći dio jalove snage. Do neravnomjerne raspodjele jalove snage, koja se lako detektira (različito pokazivanje mjerila faktora snage ($\cos\varphi$) i/ili različito pokazivanje kVAr-metara i A-metara kada kW -metri pokazuju isto) može doći zbog kvara na uzbudi, te zbog kvara ili krivog podešenja automatskog regulatora napona.

7. RASKLOP I RAZDIOBA ELEKTRIČNE ENERGIJE NA BRODU

7.1. NEUZEMLJENI BRODSKI ELEKTRIČNI SUSTAV

Neuzemljeni električni sustav se koristi na gotovo svim brodovima s niskonaponskim elektroenergetskim sustavom iako pravila registra dozvoljavaju i primjenu uzemljenog sustava (osim na tankerima gdje je neuzemljeni sustav obavezan). Kod neuzemljenog električnog sustava zvjezdište generatora nije spojeno na masu pa je cijeli sustav izoliran od trupa broda, što na prvi pogled upućuje na zaključak da potencijal trupa prema trima fazama nije definiran. Međutim, u normalnim uvjetima kada nema zemnog spoja, masa broda se zbog parazitskih kapaciteta (kapacitet kabela cjelokupne brodske mreže i svih priključenih električnih uređaja prema masi) i simetričnosti sustava, nalazi upravo na potencijalu zvjezdišta generatora. Kada dođe do zemnog spoja (spoja s masom) poteče struja koja se zatvara kroz parazitske kapacitete. Prednost izoliranog sustava je mala struja zemnog spoja a time i manja opasnost od požara i oštećenja. Veličina struje zemnog spoja zavisi od veličine ukupnog parazitskog kapaciteta a ovaj o veličini sustava. Veći sustavi imaju razgranatiju mrežu i više priključenih uređaja pa su kapacitet a time i struja zemnog spoja veći. Struja ne smije biti veća od 20A jer bi tada opasnost od požara i oštećenja uređaja bila prevelika. Velika prednost neuzemljenog sustava je i to što kada je u spoju s masom sustav može u cijelosti nastaviti sa radom sve dok ne dođe do drugog spoja s masom što tada predstavlja dvopolni kratki spoj i inicira isključenje jednog zemnog spoja kroz djelovanje zaštite od kratkog spoja. Kako je glavna ploča rasvjete odvojena od glavne rasklopne ploče transformatorom ona mora imati svoj vlastiti sustav za detekciju zemnog spoja. Detekcija spoja s masom vrši se pomoću posebnog uređaja koji neprestano mjeri otpor izolacije cijelog elektroenergetskog sustava prema masi i aktivira alarm kada on padne ispod $10k\Omega$. Istovremeno se na razvodnoj ploči ugasi zemnospojna lampa faze koja je zbog zemnog spoja došla na potencijal mase. Da bi se pronašlo mjesto zemnog spoja potrebno je uključiti u ploču ugrađeni $M\Omega$ metar koji radi pod naponom. Sada se jedan po



jedan isključuju i po potrebi ponovno uključuju svi odvodi s ploče sve dok se očitavanje na $M\Omega$ metru ne popravi (drastično se poveća otpor izolacije). Uobičajeno je da se najprije isključuju krugovi kod kojih se često pojavljuje zemni spoj (kuhinja, palubna oprema...). Trajanje spoja s masom ipak treba biti što kraće jer je izolacija sistema (kabeli i uređaji) preopterećena $\sqrt{3}$ puta odnosno 73% obzirom da je sada izložena linijskom a ne više faznom naponu. Predviđeno je da takvo stanje može trajati do 200 sati godišnje (pojačana izolacija). Kod niskog napona izolacija i tako mora biti jača zbog mogućnosti mehaničkog oštećenja pa bez problema može izdržati i produljeni rad s povećanim naponom. Kod visokonaponskih sustava je izolacija međutim slabije dimenzionirana pa je zemni spoj nužno što prije isključiti tako što se uzemljivanjem zvjezdista osigurava prorada zaštite i isključivanje dijela sustava i tako onemogućuje pojava ovog naponskog opterećenja. Veliki sustavi imaju velike parazitske kapacitete pa je i struja zemnog spoja veća od 20A što također može biti razlog za napuštanje izoliranog sustava.

Jednofazna trošila se spajaju na ploču rasvjete napajanu preko transformatora 440/220 ili 440/110V. Jednofazni potrošači napajaju se dakle s dvije faze. Stoga se uključuju i štite s dvopolnim rasklopnim uređajima.

7.2. UZEMLJENI BRODSKI ELEKTRIČNI SUSTAV

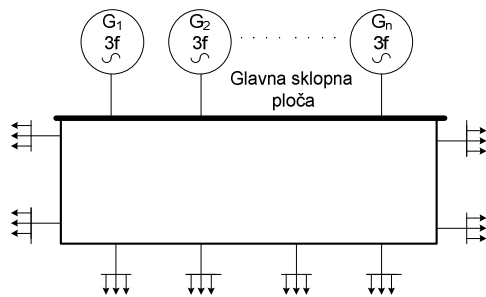
Uzemljenjem zvjezdišta generatora omogućuje se u slučaju zemnog spoja zatvaranje strujnog kruga i njegova laka detekcija i isključenje. Uređaj ili dio sustava u spoju s masom na obim sustavima dakle ne može nastaviti s radom već se odmah isključuje. Na taj se način sprječava prije opisani porast napona uslijed zemnog spoja javlja na neuzemljenim sustavima ali i sasvim pojednostavnjuje pronalaženje mjesta kvara. Prema načinu uzemljenja razlikuju se sustavi uzemljeni preko velikog otpora, preko malog otpora i direktno uzemljeni sustavi.

Direktno uzemljeni sustavi kod svakog zemnog spoja razvijaju struju jednopolnog kratkog spoja koja je reda veličine nekoliko desetaka kiloampera i stoga predstavlja povećanu opasnost od požara ali i oštećenja uređaja na mjestu kvara zbog topljenja materijala. Dobra je okolnost što će zaštita od kratkog spoja trenutačno isključiti mjesto u spoju s masom, i tako olakšati pronalaženja mjesta kvara. Kod **sustava uzemljenih preko malog otpora** koji je dimenzioniran tako da se struja zemnog spoja ograniči na vrijednost od 200 do 400A, ponovno dolazi do isključenja uređaja u kvaru ali ne pomoću postojećih zaštita od kratkog spoja već pomoću zaštita od preopterećenja ili posebnih ali relativno jeftinih zaštita. Prednost uzemljenja preko malog otpora je da su zaštite mnogo jednostavnije i jeftinije nego kod uzemljenja preko malog otpora, ali je nedostatak što se zbog veće struje povećava rizik od požara i oštećenja. Generatori na brodovima sa visokim naponom najčešće imaju **zvjezdište uzemljeno preko velikog otpora**. Otpor između zvjezdišta generatora i mase broda dimenzionira se tako da struja zemnog spoja ne pređe 20A. Poželjna je naravno čim manja struja ali ona ovisi o osjetljivosti posebnih zemnospojnih zaštita koje moraju brzo isključiti dio mreže u spoju sa masom. Što su zaštite osjetljivije to su i složenije i skuplje. Kako bi se u slučaju paralelnog rada dva generatora struja zemnog spoja zbog paralelnog spoja dva otpora udvostručila, mora se u seriju s otporima na svakom generatoru ugraditi i prekidač. Na taj se način spojevi zvjezdišta s masom mogu isključiti tako da je samo jedan od generatora u radu na masu.

7.3. **SHEME RAZVODA**

Električnu energiju potrebno je na siguran i učinkovit način raspodijeliti i provesti od izvora do potrošača. U tu svrhu koriste se sklopne ploče, transformatori i kabelski

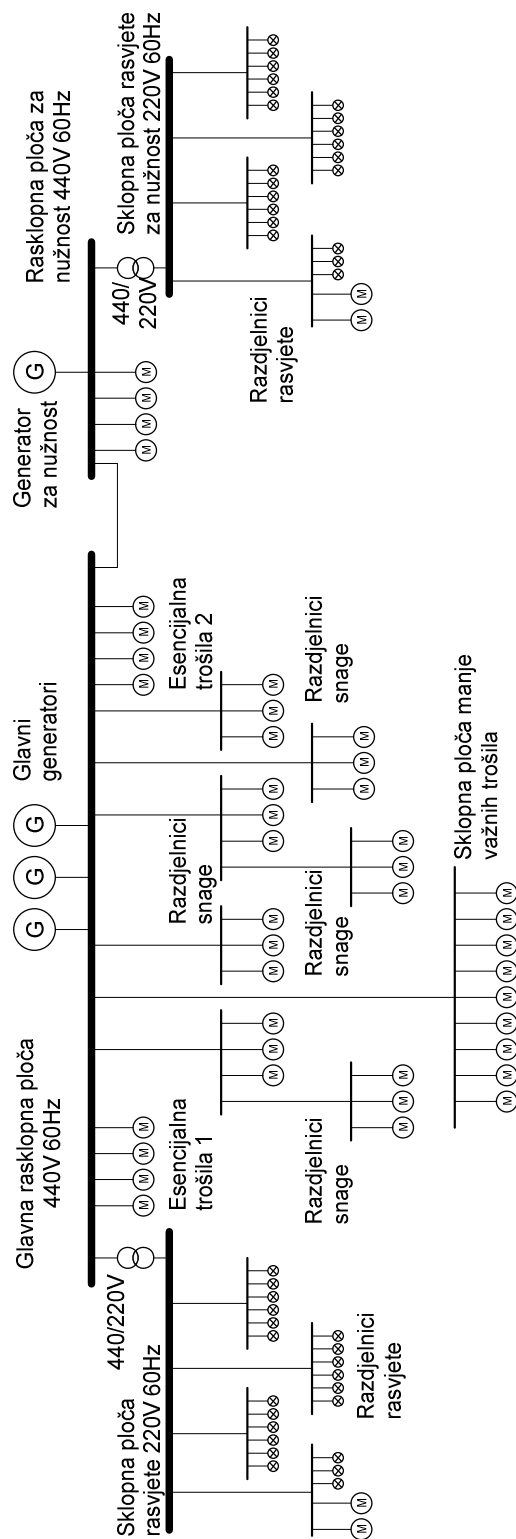
vodovi. Na brodovima se u pravilu koristi zrakasta (radijalna) shema razvoda koja se



zrakasto širi od brodske električne centrale prema potrošnji uz grananje u razdjelnicima snage odnosno rasvjete. Zrakasta shema je vrlo pregledna i stoga jednostavnija za rukovanje i održavanje, a koristi i manje duljine kabela te jednostavnije i jeftinije zaštite pa je i jeftinija.

Jedini nedostatak zrakaste sheme razvoda je da u slučaju prekida napajanja nekog dijela mreže npr. zbog prekida kabela nema mogućnosti alternativnog rezervnog napajanja, što uglavnom nije ni potrebno jer su sva vitalna brodska trošila (esencijalna trošila: pumpe ulja, goriva, rashladne vode, mora i kompresori zraka) duplirana i spojena direktno na lijevu odnosno desnu stranu glavne rasklopne ploče.

Na manjim ratnim brodovima se zbog zadržavanja funkcije najvažnijih brodskih sustava i kod prekida u napajanju uzrokovanog neprijateljskom vatrom koristi zrakasta shema s međuspojevima. Međuspojevi omogućuju alternativan put toka energije a aktiviraju se tek kada dođe do prekida. Veliki ratni brodovi koriste **prstenastu shemu razvoda** kod koje mreža zatvara prsten pa je u slučaju prekida na bilo kojem mjestu, moguće napajanje svih razdjelnika s obje strane prstena. Problem prstenaste sheme je njena manja preglednost i posebno, otežano postizanje selektivne prorade zaštite od kratkog spoja za što je potrebno koristiti skuplje usmjerene zaštite koje prepoznaju smjer toka električne energije.



7.4. SELEKTIVNA ZAŠTITA OD KRATKOG SPOJA

Uloga zaštite od kratkog spoja je da što prije isključi najmanji mogući dio sustava u kojem je nastao kvar. Tako se povećava raspoloživost sustava, jer najveći mogući dio sustava ostaje u radu, ali se istovremeno i olakšava pronalaženje mjesta kratkog spoja. Postoje četiri moguća načina za postizanje selektivne prorade zaštite od kratkog spoja: 1) **Selektivnost po struji** se koristi u mreži rasvjete i na manjim razdjelnicima snage a zasniva se na bržoj proradi osigurača s manjom nazivnom strujom. Brzina prorade je određena $t(I)$ karakteristikom osigurača (prekidača) i mora se paziti da se $t(I)$ karakteristike hijerarhijski povezanih osigurača ne sijeku jer bi to moglo izazvati neselektivno isključivanje većeg dijela sustava od nužno potrebnog. To je vrlo brzi sustav zaštite koji ne produljuje trajanje kratkog spoja već ga u vrlo kratkom vremenu isključuje i tako dobro štiti sustav od većih oštećenja ali i većih propada napona i frekvencije. 2) **Selektivnost po vremenu** se zasniva na uvođenju vremenskog kašnjenja od po 0,2 s kod svakog hijerarhijski višeg prekidača u sustavu. Tako krajnji prekidači (osigurači) izbacuju trenutno, a prekidači preko kojih je izvedeno napajanje razdjelnika na koji su krajnji prekidači spojeni kasne 0,2s. Prekidači na sljedećem nivou kasne 0,4s i tako dalje sve do generatorskih prekidača koji isključuju posljednji. Prednost vremenske selektivnosti je njeno jednostavno projektiranje i preglednost, a nedostatak da bliski kratki spoj koji bi inače bio vrlo brzo isključen traje mnogo duže i tako ugrožava stabilnost sustava zbog pada frekvencije i napona. Također generatori trpe veliku struju kratkog spoja dulje vrijeme, a na mjestu kvara dolazi do većih oštećenja. 3) **Kombinirana selektivnost** se najviše koristi a predstavlja kombinaciju strujne selektivnosti (na krajnjim odvodima) i vremenske selektivnosti prema generatorskim prekidačima. 4) **Zonska selektivnost** je najsuvremenije i najskuplje rješenje koje koristi numeričke zaštitne releje s mogućnošću međusobne komunikacije. Sabirnica (razdjelnika ili rasklopne ploče) se štiti tako da prekidač u napojnom vodu (nadređeni prekidač) isključuje samo ako niti jedan od odvodnih prekidača ne dojavljuje kratki spoj. Zaštita djeluje gotovo trenutno i tako čuva stabilnost sustava. U slučaju prekida komunikacije prelazi se na vremensku selektivnost. To znači da paralelno s komunikacijom prekidač odbrojava podešeno vrijeme i isključuje kada ono istekne.

7.5. SKLOPNE PLOČE

Sklopne ploče u elektroenergetskom sustavu broda imaju vrlo važnu ulogu jer omogućuju razdiobu električne energije. Najznačajnija je **glavna rasklopna ploča** (GRP) koja predstavlja središte elektroenergetskog sustava. U GRP se nalaze sabirnice na koje su priključeni izvori (svi generatori osim generatora za nužnost) i odvodi za pojedinačna trošila, grupne uputnike, razdjelnike snage, transformatore rasvjete i napajanje ploče za nužnost. GRP je podijeljena na polja (generatorska polja, polje sinkronizacije i polja potrošnje). U poljima se nalaze: sabirnice, sklopni uređaji (prekidači, sklopke, rastavljači), zaštite, mjerni uređaji (mjerni transformatori, instrumenti, A/D pretvornici) i uređaji za upravljanje. Moderne brodske sklopne ploče rade se isključivo u obliku modula koji se prema potrebi na jednostavan način međusobno povezuju, što olakšava ugradnju i održavanje.

Sabirnice su goli neizolirani vodiči od profiliranog bakra, na koje se direktno priključuju dovodi napajanja s generatora i odvodi prema glavnoj sklopnoj ploči. Učvršćuju se i međusobno odvajaju pomoću izolatora. Najčešće se izrađuju u obliku ravnih traka ili šupljih cijevi, jer ti oblici omogućuju najefikasnije odvođenje topline. Veličina sabirnica i izolatora, mora biti odabrana tako da može izdržati električna i mehanička naprezanja pri struji kratkog spoja. Običaj je da se sabirnice i svi ostali neizolirani vodovi i priključci kod brodskih sustava razdiobe trofazne izmjenične struje označuju posebnom bojom za svaku fazu i to: faza R (A) – žuto, faza S (B) – zeleno i faza T (C) – ljubičasto. Sabirnica glavne rasklopne ploče je podijeljena na dva dijela koja su spojena bakrenim pločicama ili preko sabirničkog rastavljača. Na svaku grupu spaja se polovica od ukupnog broja generatora, kao i polovica najvažnijih uređaja (trošila). To se prvenstveno radi zbog toga da bi i u slučaju direktnog kratkog spoja na sabirnicama, opskrba električnom energijom i dalje bila moguća nakon što se grupa sabirnica na kojima je nastao kvar isključi iz sustava.

Rasklopna ploča za napajanje u nuždi mora se nalaziti u istoj prostoriji gdje je smješten i generatora za nužnost. U normalnom pogonu napaja se iz GRP-a, a kod nestanka napona na GRP-u napajanje automatski preuzima generator za nužnost.

Razdjelnici snage su podploče raspoređene po brodu prema koncentraciji potrošnje. Napajaju se iz GRP putem priključnih kabela. Sadrže rastavljače i sklopke za

isključivanje odvoda prema priključenim trošilima i zaštite od kratkog spoja (osigurače) na svakom odvodu.

Glavna ploča rasvjete se napaja iz glavne sklopne ploče preko transformatora rasvjete. Na nju se putem priključnih kabela priključuju razdjelnici rasvjete koji su raspoređeni po brodu.

7.6. BRODSKI ELEKTRIČNI KABELO

Brodski kabelska mreža služi međusobnom povezivanju izvora električne energije, rasklopnih ploča i trošila u svrhu prijenosa električne energije, mjerenja, signalizacije i obrade signala. Brodske električne kablove možemo sa stanovišta namjene podijeliti na energetske i signalne.

Brodski kabeli moraju imati atest Registra što između ostaloga podrazumijeva da su otporni na vlak, tlak, udarce, habanje, ulje, boju, benzin, goriva, toplinu, hladnoću, sol i vlagu. Također, brodski kabeli moraju biti nezapaljivi i ne smiju podržavati gorenje. Treba međutim naglasiti da kada se nađu u vatri, svi kabeli stvaraju zagušujuće i gotovo uvijek izuzetno otrovne plinove pa je tijekom gašenja obavezna upotreba plinske maske.

Kablovi se dimenzioniraju prema nazivnoj struji i padu napona koji kod krajnjeg trošila ne smije biti veći od 5%. To znači da kabel mora biti dovoljnog presjeka da se ne pregrijava kod nazivnog opterećenja, ali i da, što je slučaj kod udaljenijih trošila, pad napona u kabelu ne bude prevelik.

Energetski kablovi koji se ugrađuju na brodove obično imaju zaštitni oklop u obliku opleta od tanke čelične ili bakrene žice. Metalni oplet povećava mehaničku čvrstoću kabela tako što ga štiti od udaraca, habanja i naprezanja. Kod energetskih kabela oplet sprječava emisiju elektromagnetskog zračenja, a kod signalnih, upravljačkih i komunikacijskih kabela induciranje napona (pojavu smetnji) zbog elektromagnetskog zračenja drugih kabela, uređaja ili atmosferskih pražnjenja.

Kabeli se obično polažu u kabelske trase izrađene od perforiranog lima (da se ne zadržava voda, smanji težina i omogući jednostavno učvršćivanje kabela). Pri polaganju kabela treba paziti: da kabeli budu što kraći (pad napona, težina, cijena, polaganje), da su

dovoljno savitljivi za jednostavno provlačenje, da ne dođe do mehaničkog oštećenja, izbjegavati izvore topline (separatori, kotlovi, grijani tankovi...), izbjegavati vlažne prostore, treba ih dobro učvrstiti (zbog vibracija, habanja i velikih sila kod kratkog spoja) i osigurati kvalitetno brtvljenje na prolascima kroz pregrade i palube. Signalni kabeli se nikada ne polažu uz energetske, a trase im se moraju sjeći pod pravim kutom kako ne bi došlo do pojave smetnji.

Kabeli se štite od kratkog spoja i preopterećenja prekidačem ili osiguračima koji moraju biti ispravno dimenzionirani.

7.7. SKLOPNI UREĐAJI

Sklopni uređaji služe za uklapanje ili prekidanje struje u jednom ili više strujnih krugova, te upravljaju radom električnih uređaja za proizvodnju, transformaciju, distribuciju i potrošnju električne energije unutar brodske elektroenergetske mreže.

Prekidač je mehanički sklopni aparat koji može uklapati, voditi i prekidati struju u normalnim uvjetima pogona, te uključiti, određeno vrijeme voditi i prekidati struju kratkog spoja. Upravljanje prekidačima ostvaruje se pomoću pogonskih mehanizama koji mogu biti, opružno-mehanički i elektromagnetski. Napinjanje opruge prekidača može biti automatsko (elektromotorno) ili ručno. Može se reći da je prekidač najvažniji dio brodske mreže jer ima zaštitnu funkciju prekidanja struje kratkog spoja. Prekidač se može isključiti: 1) ručno mehaničkim tipkalom za isključivanje, 2) ručno električkim tipkalom preko svitka za isključivanje i 3) automatski kod prorade zaštite. Prekidače razlikujemo i prema vrsti medija za gašenje električkog luka koji nastaje prilikom iskapčanja. Na brodu koristimo zračne i kod niskih i srednjih napona (do 660V), a kod visokih napona vakuumske i punjene SF6 plinom. Važno je naglasiti da za razliku od sklopnika koji je u beznaponskom stanju isključen, prekidač nakon nestanka električne energije (napona) ostaje uključen osim ako nije opremljen podnaponskim relejem koji će ga u tom slučaju isključiti.

Sklopka može uključiti, isključiti i trajno voditi struju preopterećenja ($1.2 I_n$). Svi spojni kontakti nalaze se čvrsto vezani u jednom kućištu. Uključivanje i isključivanje

sklopke obično se izvodi ručno ali može biti i daljinski upravljano. Kako sklopka nema mogućnosti prekidanja struje kratkog spoja spajaju se prije nje rastalni osigurači.

Rastavljač je mehanički sklopni aparat koji služi samo za izolaciju dijela sustava od napona i ne smije se uključivati niti isključivati pod opterećenjem (dok kroz njega teče struja). U otvorenom položaju mora osigurati vidljivi rastavni razmak koji jamči sigurnost osoblja i postrojenja. U uklopljenom položaju trajno vodi nazivnu struju, a kratko vrijeme i struju kratkog spoja.

Sklopnik je elektromagnetska sklopka koja je uključena dok kroz njen kontrolni svitak teče struja. Najviše se koristi se za upravljanje elektromotorima. Kao i sklopka može uključiti, isključiti i trajno voditi struju preopterećenja ($1,2I_n$). Uz bimetalni relej osigurava prekostrujnu i podnaponsku zaštitu motora dok se zaštita od kratkog spoja ostvaruje primjenom osigurača. Tako opremljeni sklopnici se često koriste i nazivaju zaštitne motorske sklopke. Sklopnici osim glavnih kontakata koji uključuju i isključuju energetske strujne krugove, a najčešće elektromotore, ima i pomoćne kontakte koji služe za signalizaciju i upravljanje.

Relej je također elektromagnetska sklopka poput sklopnika, ali služi samo za kontrolu, upravljanje, signalizaciju i zaštitu pa nema glavnih kontakata.

Osigurač je topivi uložak koji kod pojave preopterećenja i posebno kratkog spoja pregorijevanjem prekida strujni krug. Ima izuzetno veliku prekidnu moć (maksimalna struja koju može sigurno prekinuti), pa struju može prekinuti i u porastu, odnosno tijekom poluperiode (sklopni uređaji uglavnom naprave električni luk koji se prekine tek prolaskom struje kroz nulu na kraju poluperiode)

7.8. ELEKTRIČNE ZAŠTITE GENERATORA

Električne zaštite generatora štite brodske električne generatore ali i elektroenergetski sistem od oštećenja i požara. Dijelev se na primarne i sekundarne. Primarne zaštite su zaštita od kratkog spoja, prekostrujna zaštita i podnaponska zaštita. Najznačajnije sekundarne zaštite su: termička zaštita, zaštita od povratne snage i zaštita od preopterećenja a pored njih se ugrađuju još i: prekonaponska zaštita, podfrekventna i

nadfrekventna zaštita, diferencijalna zaštita (zaštita od unutarnjih kvarova) i zaštita od kvarova u uzbuđi. **Primarne zaštite** su smještene u generatorskom prekidaču kojeg kod ispunjenja uvjeta isključuju direktnim mehaničkim putem. **Sekundarne zaštite** su smještene izvan generatorskog prekidača i isključuju ga pomoću svitka za isključivanje.

Zaštita od kratkog spoja ($I >>$) isključuje generatorski prekidač kod bliskog kratkog spoja i tako štiti generator i sistem od oštećenja. Iako bi trenutno isključivanje bilo za generator najbolje, zaštita od kratkog spoja ima podešeno vremensko zatezanje (dt) zbog selektivnosti.

Podnaponska zaštita ($U <$) je rezervna zaštita od kratkog spoja i isključuje na $0,85U_n$ uz vremensko zatezanje zbog pokretanja velikih motora, sinkronizacije i selektivnosti isključivanja kratkog spoja.

Prekostrujna zaštita ($I >$) isključuje generatorski prekidač kada je struja generatora veća od $1,2I_n$ i tako štiti generator od oštećenja. Iako bi trenutno isključivanje bilo za generator najbolje, prekostrujna zaštita ima podešeno vremensko zatezanje (dt) kako bi se dalo vremena da proradi zaštita od preopterećenja (isključivanje manje važnih trošila) i za start i sinkronizaciju generatora u pričuvi (stand by), odnosno osiguralo da se generator ne isključi zbog kratkotrajne velike struje koju kod upućivanja povuku veliki asinkroni motori.

Zaštita od preopterećenja kad je generator preopterećen isključuje manje važna trošila odjednom ili u više stupnjeva prije nego što proradi prekostrujna zaštita što se postiže kraćim vremenskim zatezanjem.

Zaštita od povratne snage isključuje generatorski prekidač kod negativne snage odnosno kada generator pređe u motorski rad i počne uzimati energiju iz mreže opterećujući tako preostale generatore što se može dogoditi zbog kvara na sustavu pogonskog stroja (dizel motora) ili pogrešnog upravljanja. Podešava se različito od slučaja do slučaja a približno na $2-4\%P_n$ (nazivne snage) za turbine, a $10-15\%P_n$ za dizel motore. Podešava se i vremensko zatezanje zbog sinkronizacije i njihanja opterećenja.

Termička zaštita generatora aktivira se pomoću termo sonde smještene u njegovim namotima, koja isključuje generatorski prekidač kod prevelike temperature namota. Termička zaštita djeluje kao rezervna zaštita od prekostrujne i zaštite od preopterećenja, ali i samostalno štiti generator od oštećenja ako do pregrijavanja dođe zbog nedovoljnog hlađenja ponajprije u slučaju začepljenog filtra zraka na ulazu u generator.

Diferencijalna zaštita se koristi kod velikih generatora za zaštitu od unutarnjih kvarova (kratkog spoja u samom generatoru). Mjeri razliku između struje na ulazu i struje na izlazu svakog faznog namota zasebno. Pojava diferencijalne struje od $0,1I_n$ znači da je došlo do kratkog spoja u generatoru pa se isključuje generatorski prekidač i uzbuđa te zaustavlja pogonski stroj.

8. BRODSKI ELEKTROMOTORNI POGONI

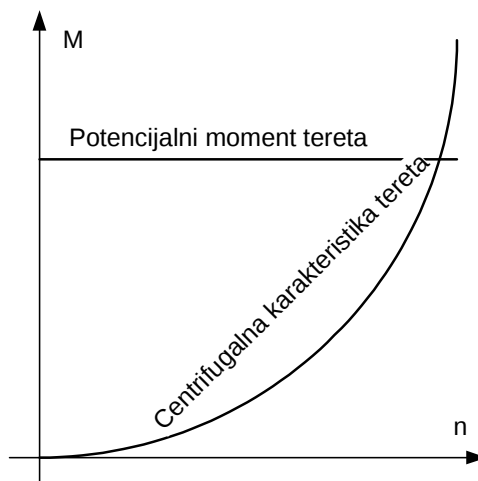
8.1. OPĆENITO O ELEKTROMOTORNIM POGONIMA

Pri odabiru elektromotora, pored nazivnog napona i frekvencije koji su određeni elektroenergetskim sustavom na koji se elektromotor priključuje, presudnu ulogu imaju karakteristike pogonjenog mehanizma odnosno tereta, pa je zbog toga potrebno analizirati cijeli elektromotorni pogon (EMP) kako nazivamo cjelokupni sklop elektromotora i pogonjenog (radnog) mehanizma. Pri tome pažnju treba obratiti na: 1) momentnu karakteristiku tereta, 2) područje rada EMP, 3) regulaciju brzine i 4) vrstu opterećenja (intermitenciju).

1) Momentne karakteristike tereta: Na

brodu se u osnovi susreću dvije momentne karakteristike tereta: potencijalna i centrifugalna. **Potencijalna karakteristika tereta** nije ovisna o brzini vrtnje što znači da je $M(n) = \text{konst.}$. Karakteristična je za teretno vitlo (dizalicu) jer obješeni teret stvara isti moment bez obzira na brzinu dizanja ili spuštanja, ali i stapne pumpe i kompresore i sl. **Centrifugalna karakteristika** ima oblik parabole () jer je moment proporcionalan

kvadratu brzine ($M(n) \sim n^2$), snaga je proporcionalna kubnoj potenciji brzine ($P(n) \sim n^3$). Karakteristična je za centrifugalne pumpe, ventilatore i propelere. Jako je povoljna za

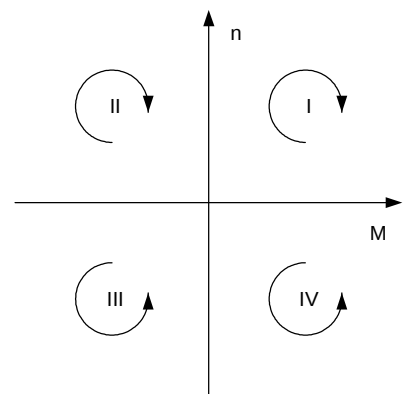


motor jer je kod malih brzina potreban vrlo mali moment što znači da je zalet mnogo brži a samim tim i zagrijavanje motora pri upućivanju mnogo manje.

2) Područje rada EMP se izražava brojem kvadranta u n - M (brzina-moment) koordinatnom sustavu. u kojim elektromotorni pogon mora raditi. Postoje dakle četiri područja (režima) rada odnosno kvadranta:

- motorski rad u desno
- generatorski rad u desno
- motorski rad u lijevo
- generatorski rad u lijevo

Jednokvadrantni pogoni rade samo u motorskom režimu u jednom smjeru vrtnje (I kvadrant). Tu spada najveći dio brodskih elektromotornih pogona (pumpe, kompresori) Četverokvadrantni pogoni rade u oba smjera vrtnje u motorskom i generatorskom režimu (svi kvadranti). Četverokvadrantni je npr. pogon propulzijskog elektromotora, elektromotora mosne dizalice i sl. Dvokvadrantni pogoni mogu biti za motorski rad i kočenje u istom smjeru vrtnje (I+II) ili motorski rad u oba smjera vrtnje (I+III) kao kod npr. ventilatora strojarnice.



3) Regulacija brzine: Većina elektromotornih pogona na brodu ne zahtijeva promjenu brzine tijekom njihovog operacijskog ciklusa. Pored takvih **jednobrzinskih** EMP (pumpe, kompresori) postoje i **višebrzinski** EMP kod kojih se brzina može mijenjati u diskretnim koracima, najčešće preklapanjem polova kod asinkronih elektromotora (vitla i bočni porivnici). Na mjestima gdje se traži fina kontinuirana regulacija brzine (propulzijski elektromotori, pumpe tereta, liftovi...) koriste se regulirani elektromotorni pogoni koji su se nekad izvodili s istosmjernim, a danas isključivo s asinkronim ili sinkronim elektromotorima napajanim iz pretvarača frekvencije.

4) Vrsta opterećenja odnosi se na učestalost i izmjenjivanje područja rada tijekom operacijskog ciklusa EMP. Vrsta opterećenja je izuzetno važna za odabir elektromotora ali i njegovu kasniju eksploataciju. Ukoliko se naime elektromotor izloži zahtjevnijoj vrsti

opterećenja od one za koju je predviđen može doći do njegovog pregrijavanja i preranog uništenja. Osnova problema leži u činjenici da elektromotor pri uključivanju na mrežu sve do svršetka zaleta radi u nepovoljnom području broja okretaja i prema tome sa strujama mnogo većim od nazivnih vrijednosti, a to znači da je izložen jakom zagrijavanju. IEC je standardizirao 8 vrsta opterećenja i označio ih oznakama od S1 do S8 što uglavnom slijedi njihovu složenost i težinu uvijeta rada za elektromotor:

S1 označava trajni pogon što znači da se motor nakon isključenja ne smije ponovno uključiti sve dok se potpuno ne ohladi (pumpe, ventilatori, kompresori...).

S2 označava kratkotrajni pogon što znači da smije raditi samo ograničeno vrijeme koje je uz oznaku S2 jasno označeno na natpisnoj pločici (npr. S2 30min.) jer bi se kod produljenog rada pregrijao iznad dozvoljene temperature što bi dovelo do brzog unoštenja izolacije. Kao i kod S1 i u slučaju vrste opterećenja S2 mora se nakon zaustavljanja prije ponovnog uključivanja pričekati da se motor potpuno ohladi. Riječ je dakle o poddimenzioniranim elektromotornim pogonima koji se koriste kratko vrijeme i u dovoljno velikim vremenskim razmacima.

S3 označava intermitirani (isprekidani) pogon. To su kratkotrajni pogoni koji se ponovno uključuju prije nego što se motor potpuno ohladio. Motor u intermitiranom pogonu S3 radi tp, zaustavi se i miruje tm, a zatim se ponovno uključuje prije nego što se potpuno ohladio. Faktor intermitencije $\varepsilon = tp/(tp+tm)$ pokazuje koliki postotak vremena je motor uključen.

S4 označava intermitirani (isprekidani) pogon sličan S3, ali s teškim zaletom koji jako ugrije motor koji se ponovno uključuju prije nego što se motor potpuno ohladio. Ovi su motori u pravilu predimenzionirani za predviđeni teret (kada bi bila riječ o trajnom pogonu) kako bi mogli podnijeti izuzetna termička opterećenja uzrokovana uzastopnim zaletima i dovoljno se ohladiti još tijekom rada. Uz oznaku S4 obavezno stoji i dozvoljeni broj ponavljanja ciklusa u sat vremena (npr: h=10).

S5 označava intermitirani pogon poput S4 ali u ovom slučaju radni ciklus uključuje i kočenje.

S6 označava trajni pogon s intermitiranim opterećenjem, što znači da se motor trajno vrti gotovo konstantnom brzinom slično kao S1 ali mu se neprestano smjenjuju vremenski period s opterećenjem i bez njega.

S7 označava trajni ciklički pogon s neprestanim zaletima i kočenjima bez stajanja.

8.2. ELEKTRIČNE ZAŠTITE ELEKTROMOTORA

bez jedne faze potrebna je samo kod elektomotornih pogona kod kojih zbog smanjenog opterećenja postoji mogućnost da će nastaviti s radom i u slučaju prekida u jednoj fazi. Gubitkom jedne faze asinkroni motor izgubi veći dio momenta, pa mu se smanji brzina vrtnje, odnosno poveća klizanje što ima za posljedicu povećanje struje i proradu zaštite od preopterećenja, ili se sasvim zaustavi pa proradi zaštita od kratkog spoja.

8.3. ELEKTROMOTORNI POGONI KORMILARSKIH UREĐAJA

Kormilarski uređaj je jedan od za sigurnost broda najvažnijih brodskih uređaja. Postoje dvije osnovne izvedbe kormilarskog uređaja: Električna i elektro-hidraulička. Kod **električne izvedbe** elektromotor u intermitiranom režimu rada preko pužnog prijenosa pogoni kormilo. Kormilarenje se izvodi promjenom smjera vrtnje elektromotora, koji se zbog čestih zaleta pojačano zagrijava, posebice kod otežanih uvjeta plovidbe (teško more, manevar). Zbog manje snage od hidrauličnog kormila koristi na manjim brodovima. **Elektro-hidraulička** izvedba je mnogo češća i primjerenija za veće brodove. U njenom slučaju kavezni asinkroni motor u trajnom režimu rada pogoni hidrauličku pumpu dok se upravljanje otklonom kormila izvodi otvaranjem i zatvaranjem ventila koji pune hidrauličke cilindre.

Zbog izuzetnog značaja kormilarskog uređaja za sigurnost broda koriste se dva motora s dvostrukim napajanjem (s glavne rasklopne ploče i s polože za nužnost) a zaštite su izvedene na način da isključe motor samo u slučaju kratkog spoja kada je motor i tako neupotrebljiv a neisključivanje bi izazvalo požar i raspad elektroenergetskog sustava. Zaštita od preopterećenja ne isključuje motor već samo aktivira alarm. U slučaju nestanka napajanja kormilo ostaje blokirano zadnjem položaju.

8.4. ELEKTROMOTORNI POGONI BOČNIH PORIVNIKA

Bočni porivnici su izuzetno velika električna trošila koja jako opterećuju elektroenergetski sustav broda. Na brodovima s dizel mehaničkom propulzijom snaga im je približno jednaka snazi jednog dizelgeneratora pa automatika centrale blokira start ako na mreži nema dovoljno priključenih generatora. Problem predstavlja i velika struja pokretanja koja izaziva propade napona i frekvencije. Ponekad se koriste zasebne sabirnice za osovinski generator (varijanta s CPP) i pramčani propeler kako bi se iskoristila njegova snaga i spriječio utjecaj bočnog porivnika na elektroenergetski sustav. Zbog velike udaljenosti i velike snage pramčanog porivnika, a kako bi se smanjila težina kabela, ponekad se i na brodovima bez visokonaponskog sustava koriste visokonaponski elektromotori napajani preko zasebnog transformatora za podizanje napona smještenog u strojarnici. Uglavnom se danas koriste tri izvedbe:

- Asinkroni kavezni jednobrzinski motor i propeler s zakretnim krilima (starta u nultom položaju krila i ne zaustavlja se do kraja manevra. (Kod starta povuče veliku struju pa se koriste indirektni uputnici)
- Asinkroni kavezni jednobrzinski motor napajan iz pretvarača frekvencije s kontinuiranom regulacijom brzine (izuzetno meki start, bez udarca struje, pretvarač frekvencije stvara smetnje u elektroenergetskom sustavu)
- Višebrzinski asinkroni kavezni motor. (starta u najnižoj brzini)

8.5. ELEKTROMOTORNI POGONI BRODSKIH PUMPI, VENTILATORA I KOMPRESORA

Elektromotori pumpi i ventilatora uglavnom rade u trajnom režimu rada S1, što znači da se u normalnim uvjetima nakon zaustavljanja motor potpuno ohladi prije ponovnog upućivanja. Uglavnom se koriste jednobrzinski asinkroni kavezni motori. Kod pumpi se najčešće koriste motori za vertikalnu montažu iznad pumpe. Regulacija dobave najčešće se vrši bypass ili prigušnim ventilom, ali sve češće, zbog štednje energije, i promjenom broja okretaja pomoću pretvarača frekvencije. Ventilatori i centrifugalne pumpe imaju na početku zaleta vrlo mali moment pa se mogu upućivati uputnikom zvijezda-trokut. Elektromotorni pogoni klipnih kompresora uglavnom startaju rasterećeni (otvoreni ventili za odzračivanje i drenažu). Koriste se također jednobrzinski asinkroni kavezni motori. Kompresori klimatizacije na velikim putničkim brodovima mogu imati vrlo veliku snagu. pa se često pogone visokonaponskim asinkronim kaveznim motorima.

8.6. ELEKTROMOTORNI POGONI SIDRENIH, PRITEZNIH I TERETNIH VITALA

Kao i u slučaju pogona kormilarskog uređaja, vitla također mogu biti hidraulička ili električna. **Hidraulička vitla** koriste elektromotore u trajnom režimu rada za pogon hidrauličkih pumpi. Kod **električnih vitala** elektromotori rade u intermitiranom režimu rada pa su termički jače opterećeni. Koriste se: višebrzinski asinkroni motori (4, 8 i 16 polova; dvostruki kavez) i danas sve češće frekventno upravljani asinkroni motori.

Elektromotori za pogon teretnog vitla su termički najopterećeniji motori na brodu jer rade u intermitiranom režimu rada S8 (višebrzinski elektromotor s uzastopnim zaletima i kočanjima) pa imaju pridodano i nezavisno hlađenje posebnim ventilatorom i ugrađenu termičku zaštitu. Vitlo je opremljeno i elektromagnetskom kočnicom napajanom istosmjernom strujom iz ispravljača. Teret se u slučaju potrebe može spustiti i ručnim otpuštanjem kočnice.

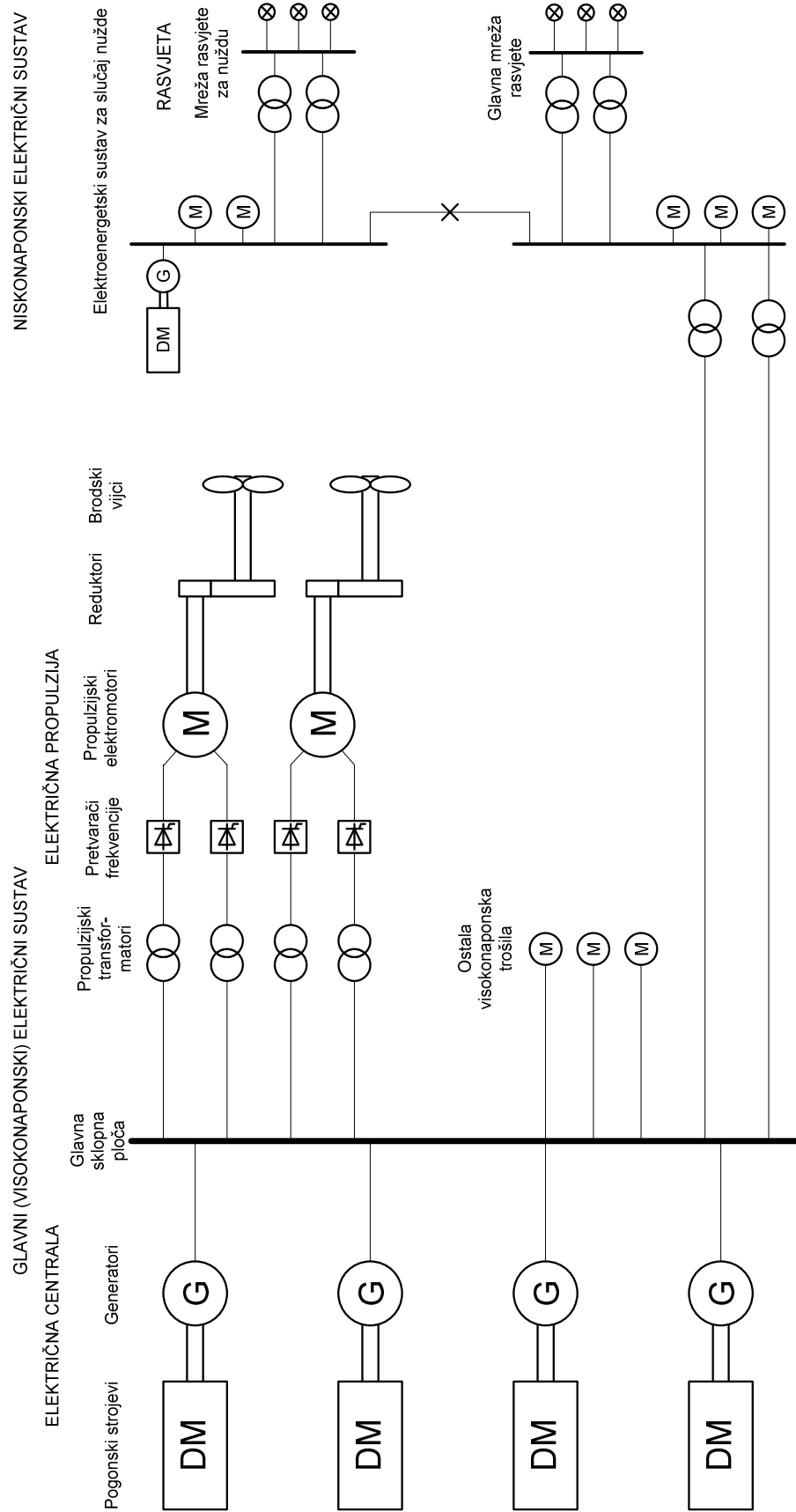
Koriste se: višebrzinski asinkroni kavezni motori (3-4 brzine) i asinkroni kavezni motori napajani iz pretvarača frekvencije, ali i istosmjerni motori napajani iz tiristorskih ispravljača i kolutni asinkroni motori kao starija rješenja.

8.7. ELEKTRIČNI PORIV BRODA

Pod električnim porivom broda (električnom propulzijom) uobičajeno se podrazumijeva elektromotorni pogon brodskog vijka. Dijeli se na potpuno električnu propulziju (podmornice, turističke eko-brodice) i propulziju s električnim prijenosom (dizel-električna, turbo-električna (plinske i parne turbine). U počecima razvoja električne propulzije brodovi su imali dvije potpuno odvojene električne centrale: jednu za sustav propulzije a drugu za napajanje ostalih brodskih električnih uređaja (koja se nije razlikovala od sličnih centrala na brodovima s dizel-mehaničkom propulzijom). Danas se međutim gotovo isključivo koristi koncepcija **potpuno integriranog elektroenergetskog sustava** (IFEP - Integrated Full Electric Ship). To znači da postoji samo jedan elektroenergetski sustav koji ima konstantnu frekvenciju i napon mreže, a pokriva električnu propulziju ali i svu ostalu potrošnju električne energije na brodu. Postoje dvije

izvedbe. Pretežno se koristi izvedba s brodskim vijkom s fiksnim krilima (FPP) uz regulaciju broja okretaja propulzijskih elektromotora pomoću statičkih pretvarača frekvencije, dok je uglavnom napuštena izvedba s brodskim vijkom s prekretnim krilima CPP uz konstantan broj okretaja propulzijskog elektromotora. Zbog velike snage sustava električne propulzije u pravilu se koristi visoki napon.

Propulzijski pretvarači frekvencije su uređaji energetske elektronike koji omogućuju kontinuiranu regulaciju frekvencije i napona za napajanje propulzijskih elektromotora i na taj način regulaciju njihovog broja okretaja. Danas su u upotrebi četiri vrste propulzijskih pretvarača frekvencije: ciklokonverter, sinkrokonverter, širinsko impulsno modulirani (PWM) pretvarač s diodnim ispravljačem i širinsko impulsno modulirani pretvarač s aktivnim mrežnim mostom. Razlike između pretvarača u pogledu manevarskih svojstava su zanemarive. S druge strane svi pretvarači frekvencije kvare kvalitetu napona brodske mreže i tako utječu na rad svih brodskih električnih uređaja (ciklokonverter je najgori jer se njegovi harmonici ne mogu filtrirati, a sinkrokonverter zahtijeva snažne harmoničke filtre od kojih barem jedan mora biti stalno uključen. Posebno je teško kada se vozi sa samo pola motora (Half motor operation) jer su tada izobličenja mrežnog napona mnogo veća. PWM s aktivnim ispravljačem se danas smatra najboljim rješenjem, jer ima gotovo sinusnu struju na propulzijskom motoru (mirniji rad motora) i mrežnom priključku (bolja kvaliteta napona brodske mreže), radi s $\cos \varphi = 1$ (manje opterećuje generatore i propulzijske transformatore) te je lakši i zauzima manje prostora.



Primjer konfiguracije objedinjenog brodskog elektroenergetskog sustava s potpuno integriranim sustavom propulzije

8.8. POMOĆNA PROPULZIJA

Pomoćna propulzija je tehničko rješenje koje je proizašlo iz mogućnosti osovinskog generatora da radi i kao motor dodajući tako brodskom vijku energiju proizvedenu u brodskoj električnoj centrali. Takav osovinski generator se označava kao **PTO/PTI** (Power Take Of /Power Take In) i može se koristiti za pomoćnu propulziju (kada ne radi glavni porivni stroj) u kom slučaju mora postojati spojka za odvajanje glavnog porivnog motora ili za povećanje brzine broda (dodaje snagu glavnom porivnom stroju). Brod opremljen pomoćnom propulzijom može u slučaju kvara glavnog porivnog stroja samostalno doploviti do luke (Take Me Home Propulsion) ili ploviti kroz ekološki zaštićena područja, te obavljati remont glavnog motora tijekom boravka u luci uz zadržavanje sposobnosti hitnog isplovljavanja u slučaju potrebe. Da bi je Registar priznao, pomoćna propulzija mora omogućiti plovidbu brzinom od 6 do 7 čv ili s pola maksimalne brzine (uzima se manja od navedenih vrijednosti).

9. BRODSKA ELEKTRIČNA RASVJETA

9.1. SUSTAVI BRODSKE RASVJETE

Električna rasvjeta je izuzetno važan brodski sustav jer bi bez nje boravak i rad posade na brodu bio praktično nemoguć. Postoje tri osnovne mreže rasvjete: **Osnovna rasvjeta** (rasvjetljava sve prostore na brodu propisanom razinom rasvijetljenosti u lx), **rasvjeta za nužnost** (napaja se iz ploče za slučaj nužnosti i obično osigurava 1/3 osnovne rasvjete), **rasvjeta za nužnost-pomoćna rasvjeta** (napajanje iz akumulatora 24V, 110V ili 220V, ali se primjenjuju i autonomne svjetiljke s vlastitim baterijama). Kod malih brodova se ne ugrađuje generator za nužnost pa postoji samo rasvjeta za nužnost napajana iz akumulatora. Kao izuzetno važna rasvjetna tijela treba posebno istaći **signalno-navigacijska svjetla (bočna svjetla, jarbolna svjetla, proveno i krmeno svjetlo)**. Za ova se svjetla koriste žarulje s dvostrukim žarnim nitima, osigurana je zvučna i svjetlosna signalizacija kvara (alarm) a napajaju se iz glavne rasklopne ploče i ploče za nužnost.

Treba spomenuti i **navigacijske reflektore** koji pomažu u navigaciji i traženju noću i pri slaboj vidljivosti.

9.2. IZVORI SVJETLOSTI

Na brodu se danas koriste tri vrste izvora svjetlosti: Žarulje, izvori svjetlosti s izbijanjem u plinu i LED diode. **Žarulje** su klasični izvori svjetlosti koji rade na principu prolaska struje kroz metalnu nit (žarna nit) što uzrokuje njeno žarenje. Kako bi se usporila oksidacija, odnosno propadanje niti, ona je smještena u staklenom balonu ili cijevi iz kojih je isisan zrak i eventualno dodan halogeni plin, (**halogene žarulje**). Obične žarulje imaju vijek trajanja oko 1000 sati rada i izuzetno nizak stupanj korisnosti jer se najveći energije pretvara u toplinu a samo 5-15% u vidljivi oblik svjetlosti. Halogene žarulje se griju na višu temperaturu pa imaju bjelje svjetlo i malo veći stupanj korisnosti ali i dvostruko dulji radni vijek (cca 2000 sati rada).

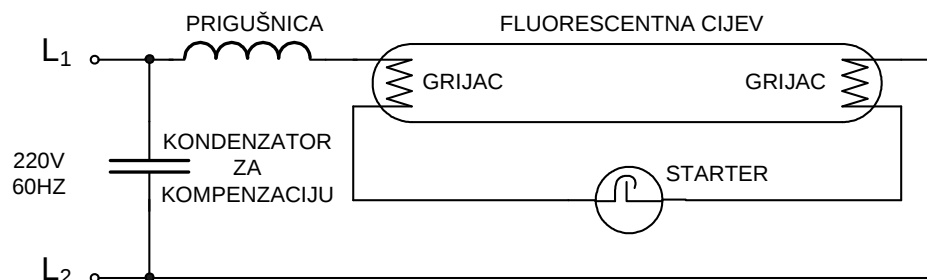
Izbijanje u plinu je prolazak struje kroz razrijeđeni plin ili paru pri čemu dolazi do elektromagnetskog zračenja. Valna duljina zračenja različita je za svaki kemijski element. Tako npr. natrijeve pare daju izrazito žuto svjetlo kod kojeg nije moguće razaznavati boje. Kvalitetnije svjetlo se dobiva kombinacijom više kemijskih elemenata. U fluorescentnim lampama se koriste živine pare koje najvećim dijelom stvaraju nevidljivo UV-zračenje, koje međutim izaziva fluorescenciju fluorescentnog premaza s unutarnje strane cijevi. Valna duljina svjetlosti u tom slučaju ovisi o vrsti premaza. Živa i fluorescentni premaz su otrovne tvari koje se ne smije udisati niti dirati, pa pri odlaganju razbijenih živinih lampi treba biti oprezan. Izvori svjetlosti s izbijanjem u plinu imaju mnogo veći stupanj korisnosti i dulji radni vijek (20 000 sati rada za fluorescentne cijevi s induktivnom prigušnicom do 40 000 sati rada s elektronskom prigušnicom).

LED diode su najsuvremeniji izvor svjetlosti. Na početku su se koristile kao signalne oznake na panelima i tiskanim pločicama, zatim za osvjetljavanje znakova za npr. evakuaciju da bi prerasle u izvore svjetlosti za baterijske svjetiljke i konačno danas postale ravnopravni izvori svjetlosti žaruljama i izvorima s izbijanjem u plinu. Led diode imaju dvije velike prednosti: Izuzetno visok stupanj korisnosti i izuzetno dug radni vijek. Za sada

im je nedostatak relativno visoka cijena, koja se međutim svakim danom sve više smanjuje.

9.3. FLUORESCENTNE LAMPE

Na slici je prikazana fluorescentna svjetiljka u **kompensiranom induktivnom spoju**. Sastoji se od fluorescentne cijevi, prigušnice, startera i kondenzatora za kompenzaciju jalove snage koji nije neophodan (kada ga nema riječ je o induktivnom spoju). Postoji još i **kapacitivni spoj** kod kojeg je (znatno skuplji) kondenzator spojen u seriju s prigušnicom. Kondenzator je kod kapacitivnog spoja dimenzioniran tako da u kombinaciji s induktivnim spojem (tzv. **duo spoj**) ukupni $\cos\varphi$ bude 1. Osnovna prednost duo spoja pred kompensiranim induktivnim spojem je fazni pomak u sinusoidama struje dvije lampe što daje ravnomjerniji svjetlosni tok odnosno mnogo manje treperenje svjetlosti. Današnji fluorescentni premazi imaju znatno veću luminiscenciju (isijavanje svjetlosti kada je cijev ugašena) pa se zbog niže cijene uglavnom koriste kompensirani

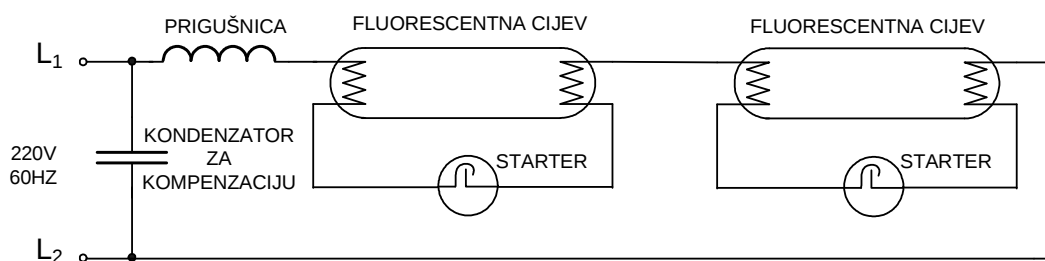


induktivni spojevi iako je duo spoj i dalje kvalitetnije rješenje.

Kao i svi drugi izvori svjetlosti s izbijanjem u plinu i fluorescentne lampe moraju imati predspojni uređaj za paljenje. Kod fluorescentnih se lampi još uvijek najčešće koristi tinjalični starter koji predstavlja minijaturnu tinjalicu punjenu plemenitim plinom kojoj je jedna elektroda od bimetalne trake pa se, kada se sklop priključi na mrežni napon i tinjalica svijetli, zagrijava i savija sve dok se ne spoji s drugom elektrodom, odnosno napravi kratki spoj. Tinjalica se pritom ugasi, a kroz elektrode (grijače) fluorescentne cijevi teče struja koja ih zažari. Nakon kratkog vremena bimetalna traka u tinjalici se ohladi i prekine strujni

krug. Energija pohranjena u magnetskom polju prigušnice izazove induciranje prenapona veličine 600-2000V koji uz pomoć zagrijanih elektroda upali fluorescentnu cijev. Kako je napon cijevi u pogonu manji od napona paljenja tinjalice ona se više neće upaliti. Prigušnica osim izazivanja prenapona ima i funkciju ograničenja struje odnosno svojim padom napona osigurava radni napon cijevi koji je približno dva puta manji od mrežnog napona. Zbog velikog induktiviteta prigušnice fluorescentna lampa predstavlja izrazito induktivni teret (nizak $\cos\phi$) što se paralelno spojenim kondenzatorom kompenzira na približno $\cos\phi=1$.

Tandem spoj prikazan na **slici** koristi se kod manjih fluorescentnih cijevi koje imaju dvostruko manji radni napon (i snagu) od velikih cijevi, pa se serijskim spajanjem dvije male cijevi mogu spojiti na istu prigušnicu kao i jedna velika cijev. Svaka cijev ima svoj starter. Da bi svjetiljka svijetlila svi elementi moraju biti ispravni (obje cijevi, starteri i prigušnica). Ako svjetiljka koja je pod naponom ne svijetli u pravilu se odmah mijenjaju obje cijevi i oba startera ne ispitujući koji je element u kvaru.



Najčešći kvarovi na fluorescentnim lampama su gubitak kontakta na spojevima startera (2 kontakta) i spojevima cijevi (4 kontakta), zatim neispravna cijev (pregorjeli grijači-elektrode ili izgubljen vakuum), neispravan starter i izuzetno rijetko neispravna prigušnica (kratki spoj ili prekid). U pravilu se bez obzira na vrstu kvara odmah mijenjaju lampa i starter uz istovremenu vizualnu kontrolu kontakata. Cijena startera i lampi je naime toliko niska da se ne isplati gubiti vrijeme na isprobavanje koji je element ispravan a koji pokvaren, jer u krajnjoj liniji i onaj ispravan već ima dovoljno sati rada da će otkazati prije od zamijenjenog elementa što će iziskivati ponovno otvaranje svjetiljke a to je i najveći dio posla kod održavanja. Dakle kada je svjetiljka jednom otvorena pametno je promijeniti sve lampe i startere. Također, jako stare cijevi izgube dio fluorescentnog sloja (najčešće na

krajevima) pa tuda emitiraju prilično opasno UV zračenje koje dokazano izaziva rak kože. Kondenzatori za kompenzaciju ponekad eksplodiraju, pri čemu svjetiljke nastave raditi. Eksplozije kondenzatora mogu se ponavljati u kojem ih je slučaju potrebno zamijeniti ili odstraniti. Kako se u praksi kondenzatori za kompenzaciju ne mijenjaju s vremenom polako raste opterećenje transformatora za rasvjetu. Danas se sve češće koriste tzv. elektronske prigušnice koje su jeftinije od klasičnih elektromagnetskih, ne trebaju starter ni kompenzaciju, produljuju trajnost cijevi a lampe se pale trenutno. Tzv. štedne žarulje su u biti integrirane fluorescentne cijevi s elektroničkom prigušnicom.

10. 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**, Pomorski fakultet u Dubrovniku, Dubrovnik 2005.
3. **I.Vlahinić, Električni sistemi plovnih objekata**, Pomorski fakultet, Rijeka 2005.
4. **B.Skalicki, J.Grilec, Brodski električni uređaji**, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2000.
5. **D.T.Hall, Practical Marine Electrical Knowledge**, Witherby, London 1999.