

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET
Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

BRODSKI ELEKTRIČNI SUSTAVI

Dr. sc. Dubravko Vučetić

Rijeka, 2015.

Sadržaj

1.	EKSPLOATACIJA BRODSKIH ELEKTRIČNIH UREĐAJA	4
1.1.	SPECIFIČNOSTI PRIMJENE ELEKTRIČNIH UREĐAJA NA BRODOVIMA.....	4
1.2.	STRUJNI UDAR.....	5
1.3.	MJERE TEHNIČKE ZAŠTITE OD STRUJNOG UDARA.....	6
1.4.	MJERE OSOBNE ZAŠTITE PRI RADU S ELEKTRIČNOM STRUJOM	7
1.5.	PROTUEKSPLOZIJSKA ELEKTRIČNA OPREMA.....	8
1.6.	KLIMATSKI UVJETI EKSPLOATACIJE BRODSKIH ELEKTRIČNIH UREĐAJA	10
1.7.	MEHANIČKA ZAŠTITE ELEKTRIČNIH UREĐAJA IP	11
1.8.	STATIČKI ELEKTRICITET.....	12
1.9.	GROMOBRAN	13
1.10.	ELEKTROMAGNETSKA KOMPATIBILNOST	14
2.	PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE NA BRODU.....	15
2.1.	IZVORI ELEKTRIČNE ENERGIJE NA BRODU	15
2.2.	DIZEL-GENERATORI	15
2.3.	OSOVINSKI GENERATORI.....	17
2.4.	OSOVINSKI GENERATOR NA BRODU S BRODSKIM VIJKOM S PREKRETNIM KRILIMA (CPP).....	18
2.5.	OSOVINSKI GENERATOR SPOJEN PREKO VARIJATORA (CON-SPEED).....	19
2.6.	OSOVINSKI GENERATOR SA STATIČKIM PRETVARAČEM FREKVENCIJE	20
2.7.	GENERATOR ZA NUŽNOST.....	20
2.8.	LUČKI GENERATOR	21
2.9.	NAPAJANJE S KOPNA.....	21
2.10.	PARALELNI RAD GENERATORA	22
2.11.	SINKRONIZACIJA	23
2.12.	RASPODJELA DJELATNE SNAGE	25
2.13.	KARAKTERISTIKE REGULACIJE FREKVENCIJE f(P).....	25

2.14.	RASPODJELA DJELATNE SNAGE [kW] IZMEĐU DVA DIZELGENERATORA.....	26
2.15.	RASPODJELA DJELATNE SNAGE [kW] IZMEĐU DIZELGENERATORA I OSOVINSKOG GENERATORA.....	27
2.16.	RASPODJELA JALOVE SNAGE [kVAr].....	28
2.17.	AKUMULATORSKE BATERIJE	29
3.	RASKLOP I RAZDIOBA ELEKTRIČNE ENERGIJE NA BRODU	32
3.1.	NEUZEMLJENI BRODSKI ELEKTRIČNI SUSTAV	32
3.2.	UZEMLJENI BRODSKI ELEKTRIČNI SUSTAV	33
3.3.	SHEME RAZVODA.....	34
3.4.	SELEKTIVNA ZAŠTITA OD KRATKOG SPOJA	37
3.5.	SKLOPNE PLOČE	38
3.6.	BRODSKI ELEKTRIČNI KABELE	39
3.7.	SKLOPNI UREĐAJI	40
3.8.	ELEKTRIČNE ZAŠTITE GENERATORA	41
4.	BRODSKI ELEKTROMOTORNI POGONI.....	43
4.1.	OPĆENITO O ELEKTROMOTORNIM POGONIMA	43
4.2.	ELEKTRIČNE ZAŠTITE ELEKTROMOTORA	46
4.3.	ELEKTROMOTORNI POGONI KORMILARSKIH UREĐAJA	47
4.4.	ELEKTROMOTORNI POGONI BOČNIH PORIVNIKA.....	47
4.5.	ELEKTROMOTORNI POGONI BRODSKIH PUMPI, VENTILATORA I KOMPRESORA	48
4.6.	ELEKTROMOTORNI POGONI SIDRENIH, PRITEZNIH I TERETNIH VITALA	48
4.7.	ELEKTRIČNI PORIV BRODA	49
4.8.	POMOĆNA PROPULZIJA	52
5.	BRODSKA ELEKTRIČNA RASVJETA	53
5.1.	SUSTAVI BRODSKE RASVJETE.....	53
5.2.	IZVORI SVJETLOSTI	53
5.3.	FLUORESCENTNE LAMPE.....	54
6.	DOPUNSKA LITERATURA:	57

1. EKSPLOATACIJA BRODSKIH ELEKTRIČNIH UREĐAJA

1.1. 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 Registara 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 Registara 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.

1.2. 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.

1.3. 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 izjednačenje 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 prorađivanje 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.

1.4. 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 **suha 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

1.5. **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.

1.6. 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.

1.7. **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 besprijekorno obavljati svoju funkciju kod trajnog bočnog nagiba od 15° i uzdužnog nagiba od 5°, odnosno kod bočnog ljuljanja $\pm 22.5^\circ$ i uzdužnog posrtanja $\pm 7.5^\circ$, koji se mogu javiti istodobno.

Stupanj mehaničke zaštite IP			
Prvi broj (mehanička 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

1.8. 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.

1.9. 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.

1.10. 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 pražnjena (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 udaljenošću 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).

2. PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE NA BRODU

2.1. 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.

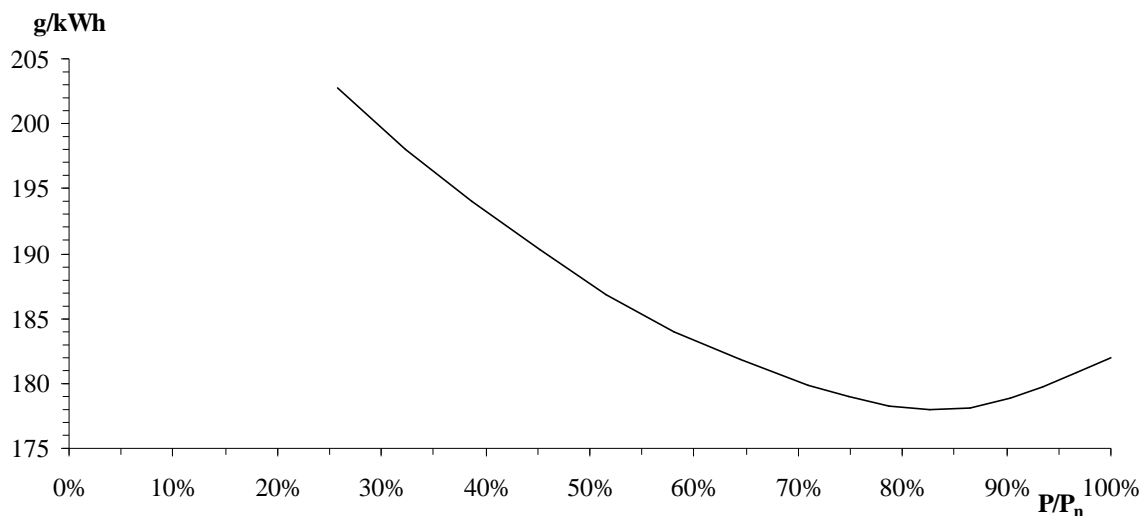
Akumulatorske baterije se koriste u akumulatorskoj stanici za napajanje sigurnosne mreže 24V na koju su priključeni pomoćna rasvjeta, automatika, komunikacije, alarmni sustav. Na velikim putničkim brodovima akumulatori mogu u nuždi napajati istosmjerne mreže 110 ili 220V. Posebne akumulatorske baterije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

2.2. 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 (SOx) i dušičnih (NOx) 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).

2.3. OSOVINSKI GENERATORI

Osovinski generatori (Shaft generator, PTO - Pover 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 energetske 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

2.4. 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 broskog vijka. Moguć je i preket (vožnja unazad) postavljanjem negativnog koraka broskog 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 broskog 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 broskog 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 manevaru 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.

2.5. 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.

2.6. 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.

2.7. 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
- ...

2.8. 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.

2.9. 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 redosljed faza
6. Uključiti prekidač za napajanje s kopna.

2.10. 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, trenutačnim 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 trenutačne potrošnje. Treba ipak napomenuti da se tijekom manevra u paralelni rad uključuje više generatora nego što je prema trenutačnoj, 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 trenutačnu 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

2.11. SINKRONIZACIJA

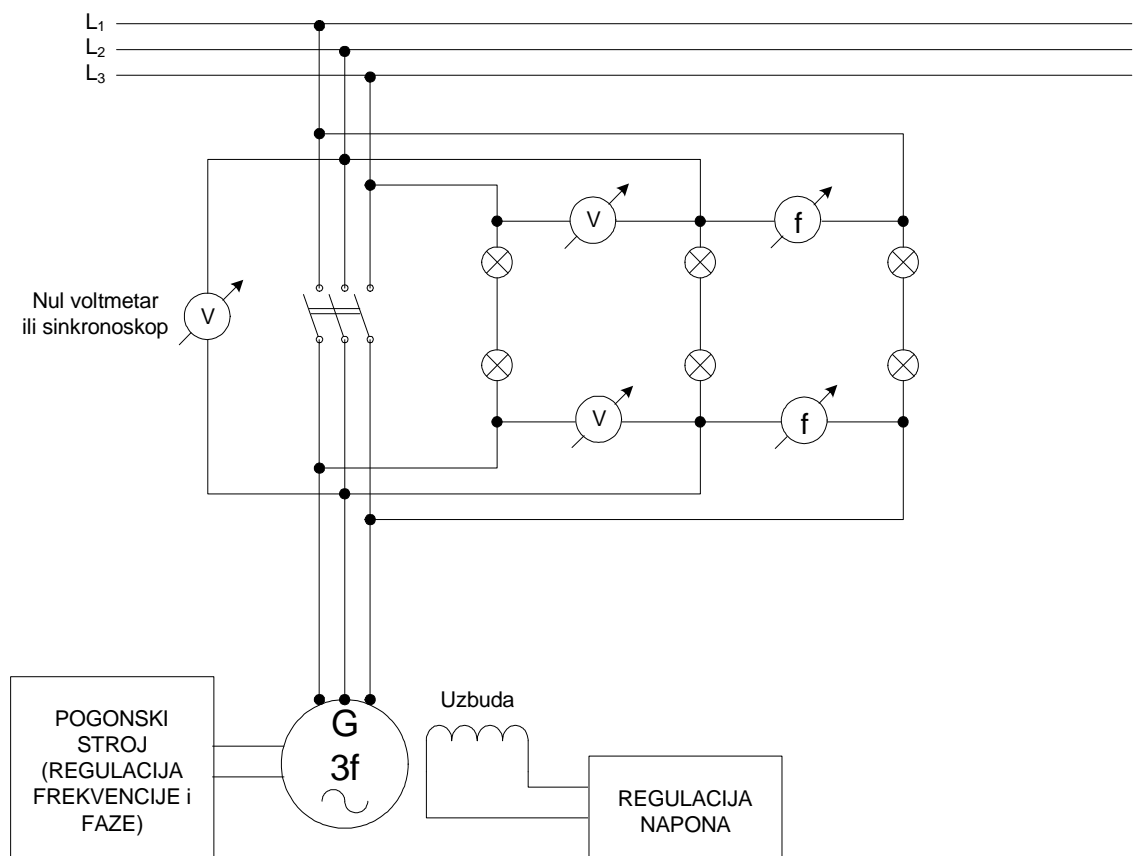
Sinkronizacija je postupak uključivanja sinkronog generatora u paralelni rad s mrežom pri čemu se, nakon što su ispunjeni svi nužni uvjeti uključuje generatorski prekidač. Svako isključivanje ili uključivanje većih trošila tijekom sinkronizacije utječe na ravnotežu sustava i produljuje vrijeme sinkronizacije (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 inducirano 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.



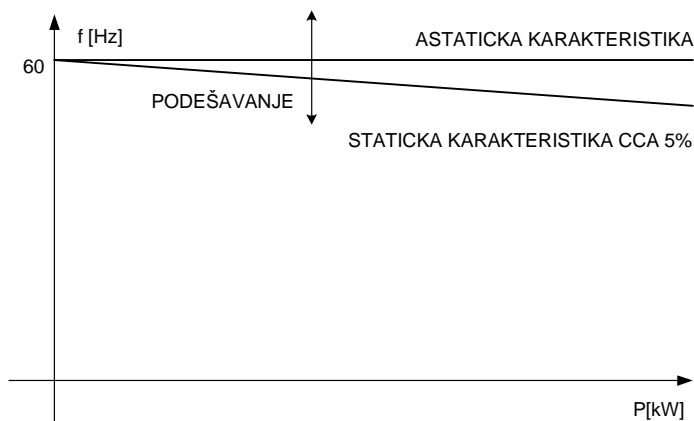
Principna shema sinkronizacijskog sklopa

2.12. 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.

2.13. 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

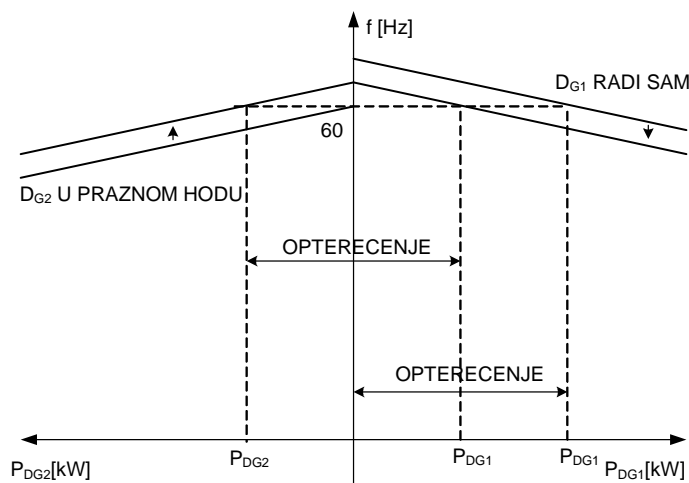


pravilu podešava tako da frekvencija kod punog opterećenja u odnosu na prazni hod (bez opterećenja) padne za 5% (3Hz) i tako ostane ukoliko se ne korigira ručno pomoću komande LOW/RISE u generatorskom polju ili polju sinkronizacije glavne rasklopne

ploče, čime se karakteristike $f(P)$ translata dolje-gore. Treba naglasiti da, ako je uključena, automatska regulacija frekvencije (frequency control) u svojstvu nadređene automatike sama translata 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 uključanja 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.

2.14. RASPODJELA DJELATNE SNAGE [kW] IZMEĐU DVA DIZELGENERATORA



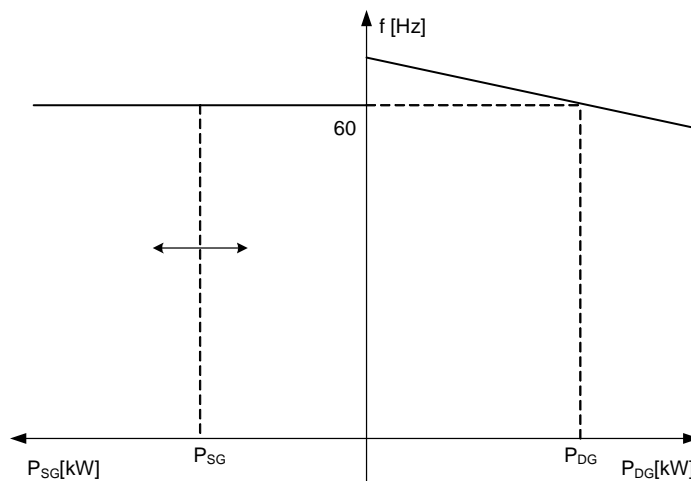
Na slici je prikazana raspodjela djelatnog opterećenja u slučaju dva jednaka dizelgeneratora s jednako podešenim statičkim karakteristikama regulacije. Prije i neposredno nakon sinkronizacije svo opterećenje je držao DG1. Nakon sinkronizacije novo-

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 isključenja 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.

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

Osovinski generator u kombinaciji sa brodskim vijkom s prekretnim krilima CPP

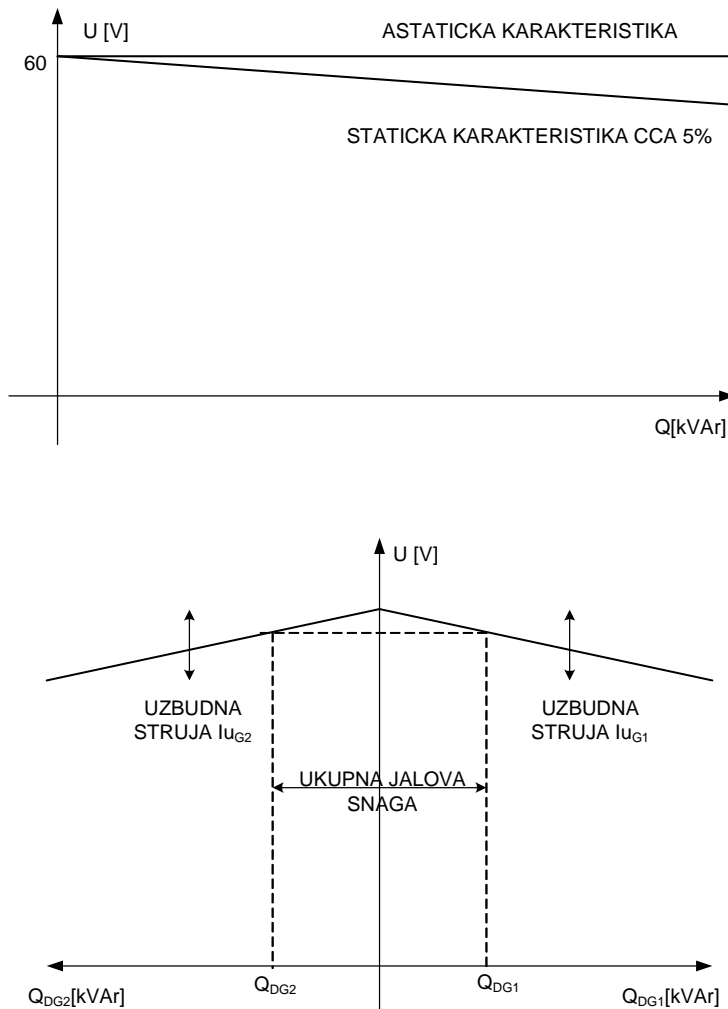


ima astatičku karakteristiku jer je snaga glavnog porivnog stroja koji ga pogoni mnogo veća od snage generatora tako da porivni stroj ne osjeća tako male promjene opterećenja. Stoga se nakon sinkronizacije raspodjela opterećenja vrši samo spuštanjem

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 brodskog 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.

2.16. 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 uzbuđe, reguliranom putem automatskog regulatora napona (AVR). Povećanjem uzbuđne 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 obavezna 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 ($\cos\phi$) i/ili različito pokazivanje kVAr-metara i A-metara kada kW -metri pokazuju isto) može doći zbog kvara na uzbuđi, te zbog kvara ili krivog podešenja automatskog regulatora napona.

2.17. AKUMULATORSKJE 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 $\text{Cd}(\text{OH})_2$. 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 olovnih. 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.

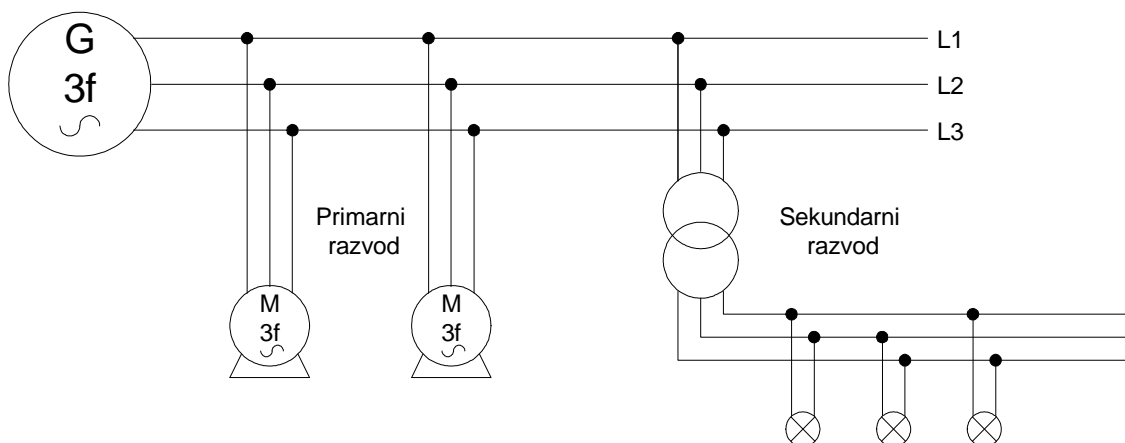
Ukoliko se zbog velikog kvara očekuje da će blackout potrajati dulje treba maksimalno smanjiti potrošnju odnosno isključiti sva nepotrebna trošila. Najmanje vrijeme u kojem baterije moraju napajati zadanu potrošnju određeno je pravilima registra i ovisi o području plovidbe i veličini i vrsti broda i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

3. RASKLOP I RAZDIOBA ELEKTRIČNE ENERGIJE NA BRODU

3.1. 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 zvjezdišta 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.

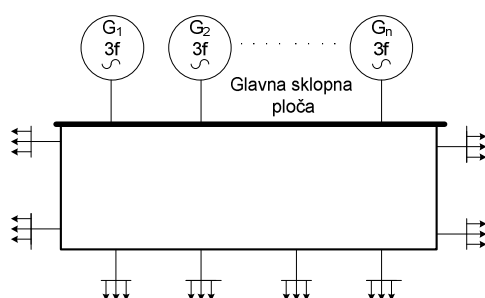
3.2. UZEMLJENI BRODSKI ELEKTRIČNI SUSTAV

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.

3.3. **SHEME RAZVODA**

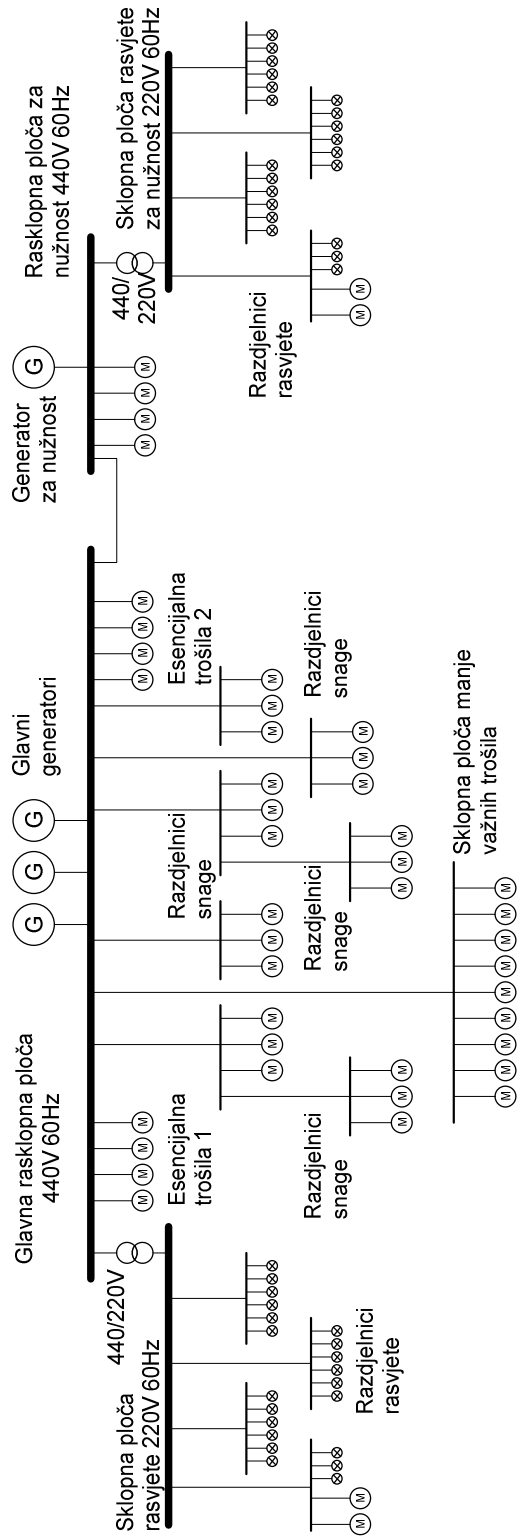
Električnu energiju potrebno je na siguran i učinkovit način raspodijeliti i provesti od izvora do potrošača. U tu svrhu koriste se sklopne ploče, transformatori i kabelski vodovi. Na brodovima se u pravilu koristi zrakasta (radijalna) shema razvoda koja se



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.



Tipična zrakasta shema razvoda električne energije

3.4. 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 brzjoj 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.

3.5. 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.

3.6. BRODSKI ELEKTRIČNI KABELI

Brodski kabela 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 obvezatna 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 kabela 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.

3.7. 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 In). 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)

3.8. ELEKTRIČNE ZAŠTITE GENERATORA

Električne zaštite generatora štite brodske električne generatore ali i elektroenergetski sistem od oštećenja i požara. Dijele 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 uzbudi. **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 ($I \gg I_n$) 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 (Δt) 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 (Δt) 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.

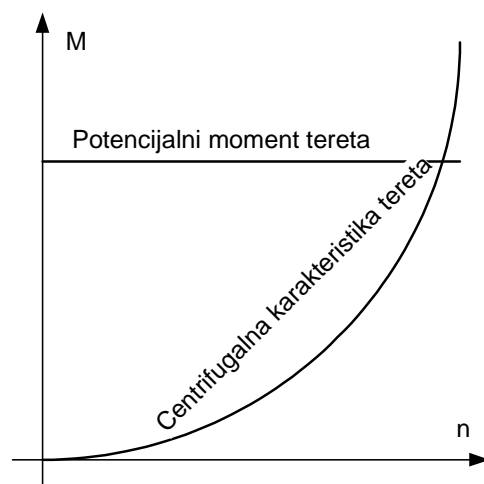
Diferencijalna zaštita se koristi kod velikih generatora za zaštitu od unutarnjih kvarova (kratkog spoja u samom generatoru). Mjeri razliku između struje na ulazu i struje na izlazu svakog faznog namota zasebno. Pojava diferencijalne struje od $0,1I_n$ znači da je došlo do kratkog spoja u generatoru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

4. BRODSKI ELEKTROMOTORNI POGONI

4.1. 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 $M(n)=konst.$ 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

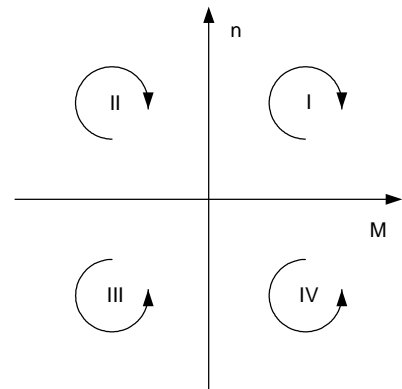


kvadratu brzine ($M(n) \sim n^2$), snaga je proporcionalna kubnoj potenciji brzine ($P(n) \sim n^3$). Karakteristična je za centrifugalne pumpe, ventilatore i propelere. Jako je povoljna za motor jer je kod malih brzina potreban vrlo mali moment što znači da je zalet mnogo brži a samim tim i zagrijavanje 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.



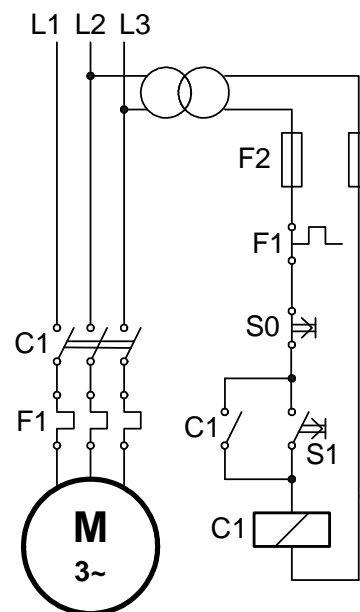
3) Regulacija brzine: Većina elektromotornih pogona na brodu ne zahtijeva promjenu brzine tijekom njihovog operacijskog ciklusa. Pored takvih **jednobrzinskih** EMP (pumpe, kompresori) postoje i **višebrzinski** EMP kod kojih se brzina može mijenjati u diskretnim koracima, najčešće preklapanjem polova 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 t_p , zaustavi se i miruje t_m , a zatim se ponovno uključuje prije nego što se potpuno ohladio. Faktor intermitencije $\varepsilon = t_p / (t_p + t_m)$ 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.
- S8** je oznaka za najzahtjevnije elektromotorne pogone i označava trajni ciklički pogon s neprestanim zaletima i kočenjima poput S7 ali uključuje i promjene brzine vrtnje. Danas se odnosi na rad višebrzinskih ainkronih motora i odgovara pogonu broskog teretnog vitla (dizalice) Ovi se motori u pravilu dodatno štite termičkom zaštitom od pregrijavanja koja ih isključuje ako im temperatura namota pređe dozvoljenu podešenu vrijednost.

4.2. ELEKTRIČNE ZAŠTITE ELEKTROMOTORA

Elektromotori obavezno imaju **podnaponsku zaštitu** (ako su napajani preko prekidača onda je ugrađen podnaponski relej, dok u slučaju upravljanja putem sklopnika kod niskog napona opruga prevlada elektromagnetsku silu u svitku sklopnika i tako ga isključuje), zaštitu od **kratkog spoja (prekidač ili osigurači)** i zaštitu od **preopterećenja** (naziva se još: prekostrujna zaštita ili bimetalna zaštita). Princip rada bimetalne zaštite prikazan je na slici. Elektromotor se uključuje preko sklopnika, koji ostaje uključen sve dok se ne prekine strujni krug koji napaja njegov svitak. U tom se krugu pored radnog kontakta samog sklopnika nalazi i kontakt bimetalne zaštite F1 koji se otvori kada se bimetal F1 pregrije (kada je struja motora kroz određeno vrijeme prevelika - sukladno $t(I)$ karakteristici bimetala). Bimetal može biti izveden s automatskim resetiranjem (motor se može ponovno pokrenuti nakon što se bimetal ohladi) ili s ručnim resetiranjem (motor se ne može pokrenuti dok se bimetal ne ohladi i pritisne reset). Ugrađuju se još i termička zaštita (kod motora koji rade u intermitiranom režimu rada kao npr. brodske dizalice) i zaštita od rada bez jedne faze. **Termička zaštita** se ostvaruje ugradnjom specijalne termo sonde (PT100) na najtoplije mjesto statorskih namotaja ili kod sasvim malih motora putem bimetalne zaštite pričvršćene na kućište motora (mjeri temperaturu kućišta). Reset termičke zaštite također može biti ručni ili automatski ali motor ne smije sam krenuti nakon što se bimetal ohladi. **Zaštita od rada 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.



4.3. **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.

4.4. **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)

4.5. 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.

4.6. 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 kočnjima) 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.

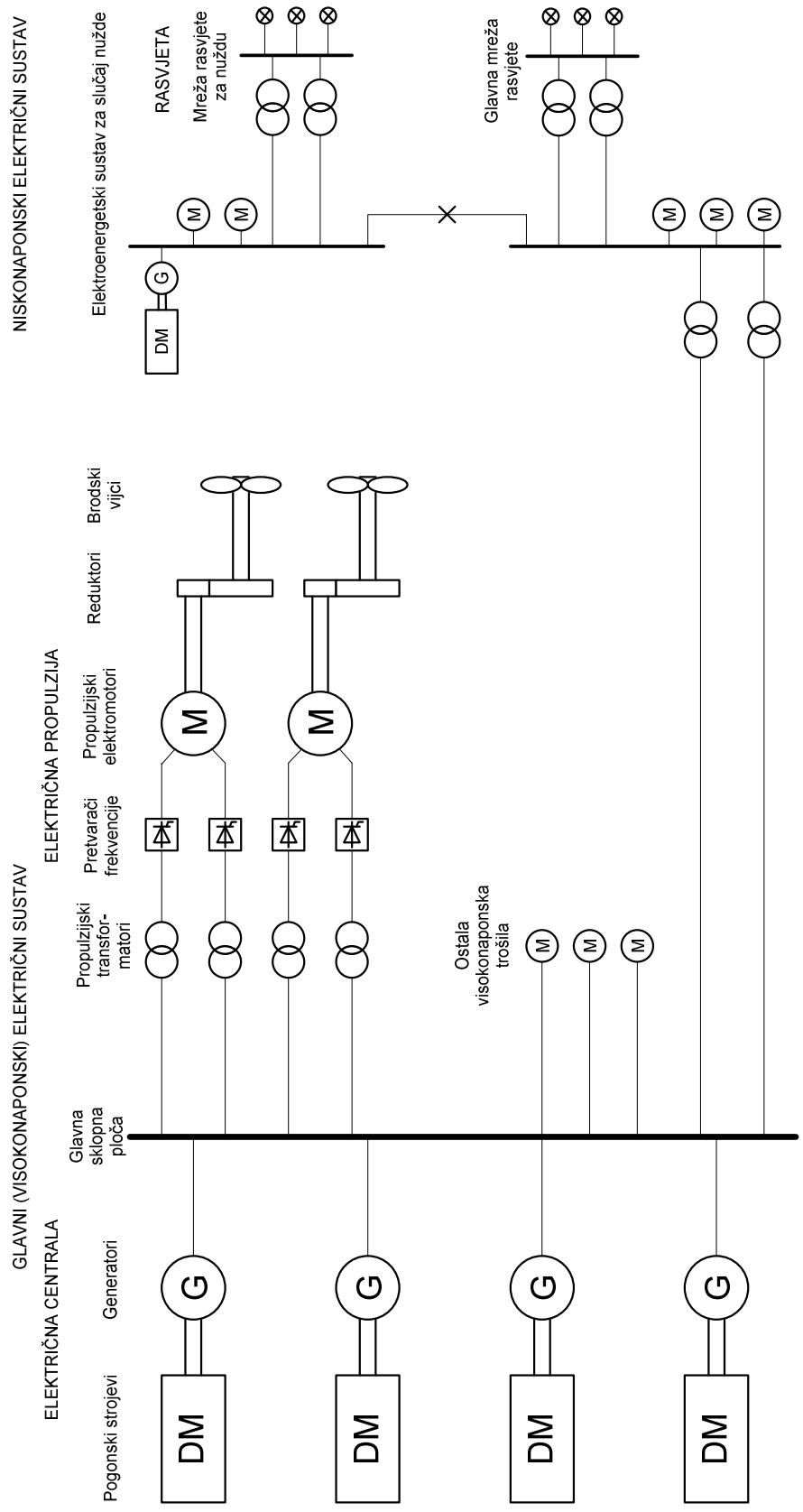
Koriste se: višebrzinski asinkroni kavezni motori (3-4 brzine) i asinkroni kavezni motori napajani iz pretvarača frekvencije, ali i istosmjerni motori napajani iz tiristorskih ispravljača i kolutni asinkroni motori kao starija rješenja.

4.7. 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 broskog elektroenergetskog sustava s potpuno integriranim sustavom propulzije

4.8. 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).

5. BRODSKA ELEKTRIČNA RASVJETA

5.1. 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.

5.2. 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).

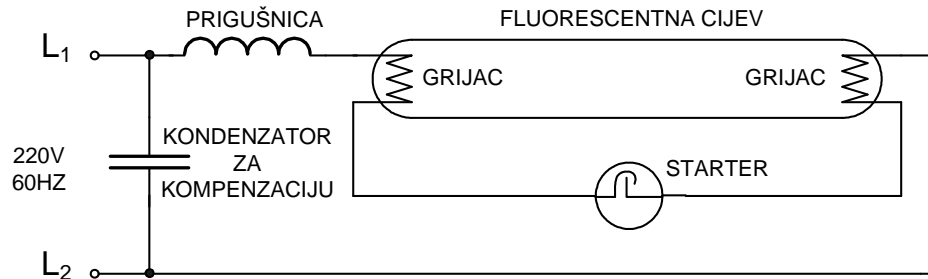
Izbijanje u plinu je prolazak struje kroz razrijeđeni plin ili paru pri čemu dolazi do elektromagnetskog zračenja. Valna duljina zračenja različita je za svaki kemijski element. Tako npr. natrijeve pare daju izrazito žuto svjetlo kod kojeg nije moguće razaznavati boje. Kvalitetnije svjetlo se dobiva 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.

5.3. FLUORESCENTNE LAMPE

Na slici je prikazana fluorescentna svjetiljka u **kompenziranom 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 kompenziranim induktivnim spojem je fazni pomak u sinusoidama struje

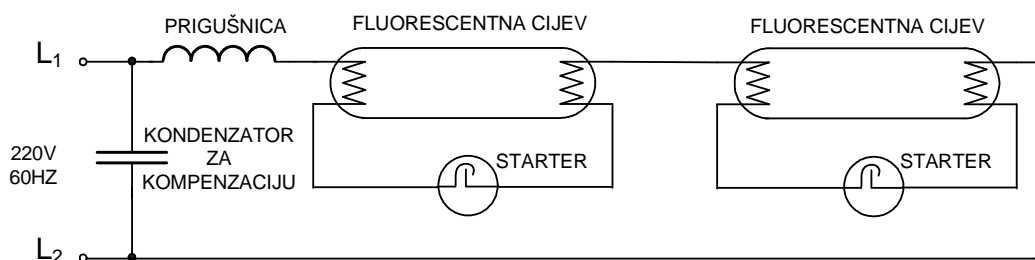
dvije lampe što daje ravnomjerniji svjetlosni tok odnosno mnogo manje treperenje svjetlosti. Današnji fluorescentni premazi imaju znatno veću luminiscenciju (isijavanje svjetlosti kada je cijev ugašena) pa se zbog niže cijene uglavnom koriste kompenzirani



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.

6. DOPUNSKA LITERATURA:

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