

Održavanje elektroenergetskog sustava putničkog broda Norwegian Gem

Jovičić, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:721608>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-26**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



uniri DIGITALNA
KNJIŽNICA



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

MARKO JOVIČIĆ

**ODRŽAVANJE ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA
PUTNIČKOG BRODA NORWEGIAN GEM**

DIPLOMSKI RAD

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

**ODRŽAVANJE ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA
PUTNIČKOG BRODA NORWEGIAN GEM
MAINTENANCE OF THE ELECTRICAL POWER SYSTEM
ON THE PASSENGER SHIP NORWEGIAN GEM**

DIPLOMSKI RAD

Kolegij: Ispitivanje brodskih električnih uređaja

Mentor/komentor: doc. dr. sc. Miroslav Bistović

Student/studentica: Marko Jovičić

Studijski smjer: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112073457

Rijeka, rujan 2023.

Student: Marko Jovičić

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112073457

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI DIPLOMSKOG RADA

Kojom izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom
ODRŽAVANJE ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA PUTNIČKOG BRODA
NORWEGIAN GEM

izradio samostalno pod mentorstvom
doc. dr. sc. Miroslav Bistović

U radu sam primijenio metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju diplomskog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u diplomskom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezao s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student



Marko Jovičić

Student: Marko Jovičić

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112073457

IZJAVA STUDENTA – AUTORA
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG DIPLOMSKOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor diplomskog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa diplomskim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog diplomskog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student – autor



(potpis)

SAŽETAK

Putnički brodovi predstavljaju kompleksne tehničke sustave koji omogućavaju udobno putovanje i boravak putnika diljem svijeta. Održavanje optimalne funkcionalnosti i sigurnosti tih brodova zahtijeva visoku razinu stručnosti i pažnje. Jedan od ključnih aspekata održavanja putničkih brodova jest upravljanje električnim sustavima visokog napona koji pokreću brodske operacije i pružaju potrebne usluge putnicima. Međutim, rukovanje s visokim naponom na brodu nosi sa sobom značajne tehničke izazove i sigurnosne rizike koji zahtijevaju precizne procedure, stručnost osoblja te dosljedno poštivanje sigurnosnih standarda. U skladu s tim, ovaj diplomski rad usmjerava pažnju na dva ključna aspekta: prvo, na kompleksnost i izazove koji proizlaze iz održavanja putničkih brodova, te drugo, na važnost učinkovitih i sigurnih postupaka rukovanja uređajima visokog napona unutar brodskih električnih sustava na primjeru putničkog broda Norwegian Gem.

Ključne riječi: *putnički brod, visokonaponski sustav, generatori, električna propulzija, sigurnosne procedure*

SUMMARY

Passenger ships represent complex technical systems that enable comfortable travel and accommodation for passengers worldwide. Maintaining optimal functionality and safety of these vessels requires a high level of expertise and attention. One of the key aspects of maintaining passenger ships is the management of high-voltage electrical systems that power maritime operations and provide essential services to passengers. However, handling high voltage onboard entails significant technical challenges and safety risks that demand precise procedures, personnel expertise, and consistent adherence to safety standards. Accordingly, this master's thesis focuses on two key aspects: firstly, the complexity and challenges arising from the maintenance of passenger ships, and secondly, the importance of effective and secure procedures for handling high-voltage equipment within Norwegian Gem shipboard electrical systems.

Keywords: *passenger ship, high-voltage system, generators, electric propulsion, safety procedures*

SADRŽAJ

| | |
|--|------------|
| SAŽETAK | II |
| SUMMARY | II |
| SADRŽAJ..... | III |
| 1. UVOD..... | 5 |
| 1.1. Problem i predmet istraživanja | 5 |
| 1.2. Svrha i ciljevi istraživanja..... | 6 |
| 1.3. Znanstvene metode | 6 |
| 1.4. Struktura rada..... | 7 |
| 2. TEMELJNE ZNAČAJKE VISOKONAPONSKOG SUSTAVA..... | 8 |
| 2.1. KRITERIJ KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE..... | 8 |
| 2.1.1. Utjecaj hamoničkih izobličenja..... | 16 |
| 2.1.2. Propisi klasifikacijskih ustanova na izobličenje napona | 17 |
| 2.2. KLASIFIKACIJA NAPONSKIH VELIČINA..... | 20 |
| 2.3. MJERE SIGURNOSTI ISPITIVANJA VISOKOG NAPONA | 21 |
| 2.4. PRAVILA RUKOVANJA VISOKONAPONSKIM SUSTAVOM..... | 24 |
| 2.4.1. Opći sigurnosni standardi..... | 24 |
| 2.4.2. Sigurnosne procedure..... | 25 |
| 3. ELEKTROENERGETSKI SUSTAV PUTNIČKOG BRODA | 28 |
| 3.1. IZVORI ELEKTRIČNE ENERGIJE | 29 |
| 3.1.1. Dizel-generator..... | 30 |
| 3.1.2. Generator za nuždu..... | 34 |
| 3.1.3. Sustav besprekidnog napajanja | 35 |
| 3.2. RASKLOP I DISTRIBUCIJA ELEKTRIČNE ENERGIJE | 38 |
| 3.2.1. Glavna rasklopna ploča | 39 |
| 3.2.2. Visokonaponski transformatori | 41 |
| 3.2.3. Pretvarači frekvencije..... | 42 |
| 3.2.4. Visokonaponski strujni prekidači..... | 43 |
| 3.2.5. Brodska kabela mreža..... | 47 |
| 3.3. SUSTAV ELEKTRIČNE PROPULZIJE..... | 50 |
| 4. STUDIJA SLUČAJA – NORWEGIAN GEM..... | 52 |

| | |
|---|-----------|
| 4.1. PREGLED KONFIGURACIJE STROJARNICE..... | 53 |
| 4.2. ODRŽAVANJE GENERATORA | 56 |
| 4.2.1. Paralelni rad generatora..... | 57 |
| 4.2.2. Postupak sinkronizacije..... | 59 |
| 4.2.3. Zaštite generatora | 61 |
| 4.3. MJERENJE OTPORA IZOLACIJE | 65 |
| 4.4. IZOLACIJA I UZEMLJENJE SUSTAVA | 68 |
| 4.4.1. Izolacija visokonaponske ploče..... | 69 |
| 4.4.2. Izolacija glavnih generatora | 74 |
| 4.4.3. Osiguravanje propulzijske jedinice motora..... | 75 |
| 5. ZAKLJUČAK..... | 78 |
| LITERATURA | 79 |
| POPIS KRATICA | 80 |
| POPIS SLIKA | 81 |
| POPIS SHEMA | 82 |
| POPIS TABLICA..... | 82 |
| POPIS GRAFIKONA | 82 |

1. UVOD

1.1. PROBLEM I PREDMET ISTRAŽIVANJA

Kroz godine, putnički brodovi su doživjeli izniman napredak u tehnologiji, dizajnu i funkcionalnosti. Od skromnih početaka, kada su se koristili jednostavni drveni brodovi s jedrima, do današnjih luksuznih i tehnološki naprednih plovila, putnički brodovi su se razvijali kako bi zadovoljili udobnost i sigurnost putnika, te pružili nezaboravno iskustvo kružnog putovanja. Iako su skoro svi potrebni električni uređaji na brodovima sličnog dizajna i koncepta rada kao i oni u kopnenim električnim sustavima, korištenje tih uređaja u pomorskim uvjetima općenito je znatno izazovnije. Neprekidan rast dimenzija brodova zajedno s njihovim električnim postrojenjima, uvjetovalo je ugradnjom postrojenja za proizvodnju i distribuciju visokog napona. Shodno tome, da bi se takva visokonaponska postrojenja mogla upravljati i održavati vitalnim za potrebe opskrbe broda kvalitetnom energijom, nužno je visokokvalificirano stručno osoblje koje mora posjedovati znanja i vještine o istom. U tom smislu, prvi korak prema ublažavanju posljedica je temeljita provjera ispravnosti, pouzdanosti i pravilnog funkcioniranja svih električnih komponenti na brodu.

Gledajući širu sliku i svrhu putničkog broda za kružna putovanja koja kombinira luksuz, rekreaciju, komercijalne aktivnosti i logističke izazove na jedinstven način, on je opremljen širokim spektrom tehničkih sustava uključujući električne, elektroničke, strojarske, hidrauličke, komunikacijske i navigacijske sustave. Naprotiv, sve ove komponente i još mnogo toga čine moderni putnički brod izuzetno složenim entitetom koji zahtijeva koordinaciju različitih timova ljudi i posade, pripremu, dijagnostiku, naprednu tehnologiju, strog nadzor i poštivanje propisanih zakonskih regulativa.

Iz te činjenice proizlazi **problem istraživanja**: tijekom kontinuirane opskrbe krajnjih trošila za pogon i sigurnost putničkog objekta, očuvanje ljudskih života uvijek mora biti najbitniji prioritet, što u praksi kad je riječ o visokom naponu nije lak zadatak. Veliki putnički brodovi zajedno s pripadajućom posadom i elektroenergetskim sustavom, izloženi su smetnjama stohastičke i nepredvidljive prirode zbog učestale promjene broskog manevra koji pomoću sustava elektropropulzije mora omogućiti vožnju u svim smjerovima unatoč svim vremenskim prilikama. Specifičnije, časnici brodske elektrotehnike suočeni su s nizom nepredvidivih situacija koje mogu negativno utjecati na elektroenergetski sustav broda i kao rezultat dodatno utjecati na stvaranje prenapona, prekida strujnih krugova, proboja izolacije, preopterećenja, torzijskih

vibracija, reduciranja snage, neefikasnost korištenja brodskog goriva i električne energije, koja će u konačnici smanjiti sigurnost putnika i posade koja mora uvijek biti glavni prioritet.

Iz navedenih problema, proizlazi i **predmet istraživanja**: istražiti i definirati tehničke parametre i aspekte primjene visokog napona na brodu, odrediti što uvjetuje smanjenje ili poboljšanje sigurnosti prilikom rukovanja električne opreme pod visokim naponom, predvidjeti potencijalne električne opasnosti upravljanja visokonaponskom infrastrukturom i postupke koje časnici elektrotehnike moraju provoditi u skladu s normama i propisima kako bi kruzer nesmetano obavljao svoju funkciju „plutajućeg hotela“.

1.2. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Svrha istraživanja je razmatranje djelovanja, procesnih i posljedičnih pojava u radu s visokonaponskim sustavima kao neizostavnog dijela elektro-propulzije putničkog broda Norwegian Gem u svrhu bolje sigurnosti i pouzdanosti operatera. Cilj je razmotriti postojeće preporuke i smjernice koje će povećavaju sigurnost, zaštitu osoblja i putnika te učinkovitost procesa iskapčanja i izolacije uređaja visokog napona na kruzerima. U skladu s formuliranom svrhom i ciljem istraživanja, rad daje odgovore na sljedeća pitanja:

- 1) Što je kvaliteta električne energije?
- 2) Kako klasificiramo vrijednosti napona?
- 3) Kako je organiziran elektroenergetski sustav putničkog broda?
- 4) Kako teče postupak sinkronizacije generatora na mrežu?
- 5) Zašto je važno mjeriti otpor izolacije strojeva?
- 6) Kako izgleda postupak izolacije visokonaponske ploče?
- 7) Zašto je važno slijediti propisane procedure izolacije uređaja iz sustava?

1.3. ZNANSTVENE METODE

Pri istraživanju i formuliranju rezultata istraživanja u odgovarajućoj kombinaciji korištene su sljedeće znanstvene metode: metoda analize i sinteze, metoda generalizacije i specijalizacije, metoda indukcije i dedukcije, metoda klasifikacije, metoda deskripcije, komparativna metoda te metoda dokazivanja.

1.4. STRUKTURA RADA

Rezultati istraživanja predočeni su u pet međusobno povezanih dijelova.

U Uvodu su navedeni problem, predmet i objekt istraživanja, svrha i ciljevi istraživanja i obrazložena je struktura rada.

Drugi dio rada uvodi čitatelja u pojmove i kriterije vezane uz elemente i kvalitetu električne energije, klasifikaciju napona i sigurnosne procedure prilikom rukovanja na visokonaponskim sustavima.

Treći poglavlje rada posvećeno je brodskom sustavu visokog napona. U tom dijelu rada opisani su najbitniji dijelovi sustava koji objedinjuju cjelinu u integralni skup za proizvodnju i distribuciju energije koja se sastoji od dizel-generatora, rasklopnih ploča, sklopnih aparata pa sve do potrošača od kojih je najbitnija električna propulzija podtrupnih potisnika.

Pretposljednje poglavlje posvećeno je pregledu i opisu strojarnice putničkog broda Norwegian Gem te realizaciji specifičnih vrsta rada u visokonaponskom okruženju za časnike elektrotehnike Gem. Predstavljene su i opisane procedure rukovanja visokonaponskom opremom i ispitivanja otpora izolacije generatora kao jednog od najbitnijih komponenti sustava.

U posljednjem dijelu, Zaključku, stvoren je osvrt na analizu i sintezu promatranih postupaka rukovanja i sigurnosnih procedura kako bi visokonaponski rad za radno osoblje na brodu bilo što sigurnije.

2. TEMELJNE ZNAČAJKE VISOKONAPONSKOG SUSTAVA

Kad je riječ o brodskim električnim uređajima, gotovo da nema razlike u odnosu na one koji su zastupljeni u kopnenim električnim infrastrukturama. Međutim, njihova izvedba zahtijeva mnogo strože kriterije eksploatacije koje uvjetuju detaljno propisana pravila klasifikacijskih društava čiji su propisi prilikom gradnje plovnih objekata usmjerena prema povećanju sigurnosti od električnog udara, eksplozija i požara, otpornosti na elektromagnetsku kompatibilnost i otpornosti na vremenske uvjete. Pored niza pozitivnih aspekata kao što su: jednostavnost prijenosa energije, visoki stupanj pouzdanosti i minoran utjecaj na okoliš, brodski električni sustavi imaju i iznimne nedostatke kao što su opasnost od strujnog udara, izazivanja eksplozije i požara te osjetljivost na vlagu. Sukladno tome, pravilan odabir vrste i naponskog nivoa električnog sustava ima uvelike utjecaja kad je riječ o sigurnosti posade i rukovanju plovnim objektom.

Uzimajući u obzir stroge propise i standarde koji reguliraju brodske električne sustave, ispitivanje je ključno za osiguravanje usklađenosti s propisima i dobivanje certifikata i dozvola za plovidbu. Kroz sustavno ispitivanje, identificiraju se potencijalni nedostaci ili kvarovi u sustavu prije nego što dođe do ozbiljnijih problema, što omogućava pravovremeno održavanje i popravke. Time se smanjuje vrijeme zaustavljanja broda i održava njegova operativnost. Nadalje, ispitivanje i redovita provjera brodskih električnih sustava pridonosi ekonomičnosti plovidbe. Otkrivanje energetske gubitaka, neispravnih komponenti ili nepotrebnih opterećenja omogućava optimizaciju sustava, smanjenje potrošnje energije i troškova te poboljšanje učinkovitosti. Uz sve navedeno, redovito ispitivanje brodskih električnih sustava ima ključnu ulogu u održavanju sigurnosti putnika i posade, pouzdanosti operacija, usklađenosti s propisima, održavanju i ekonomičnosti.

2.1. KRITERIJ KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Pod kvalitetom električne energije zapravo podrazumijevamo kvalitetu napona, a to proizlazi iz pretpostavke da elektroenergetski sustav može osigurati i garantirati kvalitetni napon, ali ne može utjecati na struje koje iz sustava uzimaju pojedini potrošači, iako postoji čvrsta veza između napona i struje. Prikladna kvaliteta električne energije jamči potrebnu kompatibilnost između opreme i mreže. Kvaliteta električne energije stoga pokriva dvije skupine poremećaja: varijacije i događaje. Dok su varijacije konstantno mjerene i procjenjivane, događaji su često nepredvidljive pojave i zahtijevaju određen događaj kako bi se mogli izmjeriti. Važne varijacije su: spore

promjene napona, harmonici, flikeri i asimetrija. Važni događaji su brze promjene napona, propadi i prekidi. Realna kvaliteta električne proizlazi iz međusobne interakcije priključne opreme i mreže.¹

Trošak loše kvalitete električne energije se može opisati kao događaj u električnoj mreži što u konačnici rezultira financijskim gubitkom. Neki od mogućih posljedica su:

- neočekivani kvarovi napajanja (npr. izbacivanje prekidača iz mreže)
- povećanje gubitaka u sustavu
- pregrijavanje opreme (transformatori, elektromotori, itd.) čime se smanjuje životni vijek
- kvarovi ili neispravnost opreme
- oštećenje osjetljive opreme (npr. osobna računala)
- smetnje u elektroničkim sustavima komunikacije
- potreba za povećanjem postrojenja kako bi sustav mogao podnijeti dodatna opterećenja te dodatni troškovi rada tih postrojenja
- troškovi zbog zagađenja mreže
- zdravstveni problemi i smanjenja efikasnosti osoblja²

Tehničke karakteristike električne energije isporučene trošilu promatraju se preko mrežnog napona odnosno preko njegove veličine, valnog oblika i frekvencije, te mogućih smetnji. Tehnički parametri električne energije, tj. napona koji se promatraju su:

- mrežna frekvencija
- veličina napona
- promjene napona
- treperenje napona
- propad napona
- prekid napona
- prenapon
- impulsni prenapon

¹ M.H.J. Bollen.: **Power Quality aspects of Smart Grids, International Conference on Renewable Energies and Power Quality**, Granada, Španjolska, 2010., str. 1-6

² Schipman K., Delince F.: **The importance of good power quality**, ABB Power Quality Products, Belgija

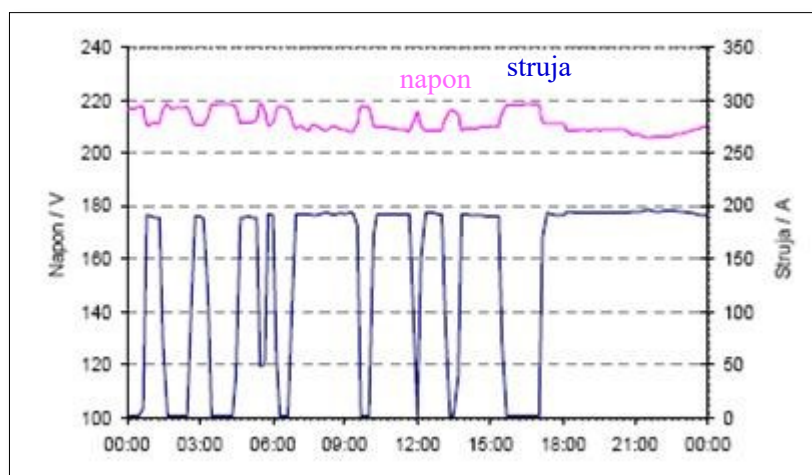
- nesimetrija napona
- valovitost napona
- pulsni broj
- naponi viših harmonika
- naponi međuharmonika
- signalni naponi

Mrežna frekvencija je broj titraja naponskog vala u jednoj sekundi. U europskim elektroenergetskim mrežama iznosi 50 Hz, dok u Sjedinjenim Američkim Državama je 60 Hz. Na brodskim sustavima njezina vrijednost također iznosi 60 Hz.

Veličina napona definirana je kao efektivna vrijednost napona na mjestu predaje električne energije u određenom trenutku, mjerena u određenom vremenskom periodu. Referentna vrijednost određena je nazivnim naponom mreže.

Promjene napona su odstupanja napona od nazivne vrijednosti. Uzrokovane su promjenama opterećenja, odnosno uključivanjem i isključivanjem velikog broja trošila ili kvarovima u elektroenergetskom sustavu.

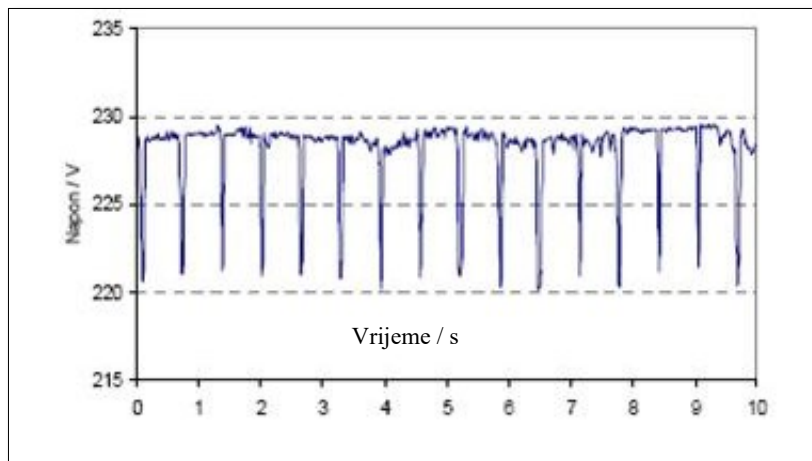
Graf 1. Primjer promjene napona uzrokovane promjenom opterećenja



Izvor: <https://energija.co.rs/tehnicki-parametri-elektricne-energije/>

Treperenje napona (eng. Flicker) se očituje u oscilacijama vrijednosti napona koje se ponavljaju. Flickeri su definirani kao vidom zametljivo treperenje, izazvano svjetlosnim podražajem uz vremensko kolebanje svjetlosne gustoće ili spektralne razdiobe. Laički rečeno, to je titranje npr. svjetla žarulje ili zaslona računala. Uzroci treperenja su nagle učestale promjene napona i ovisni su o amplitudi, fluktuaciji i učestalosti ponavljanja. Uočavanje treperenja zavisi od osobe do osobe, odnosno o senzibilnosti oka. Jačina treperenja definira se putem uočavanja sljedećeg: svjetlosno treperenje pojačava se do trenutka kada od 100 osoba njih 50 uoči treperenje (promjenu svjetla), tada se kaže da treperenje ima vrijednost 1. Ljudskom oku najviše smetaju flickeri frekvencije od 7 do 10 Hz.

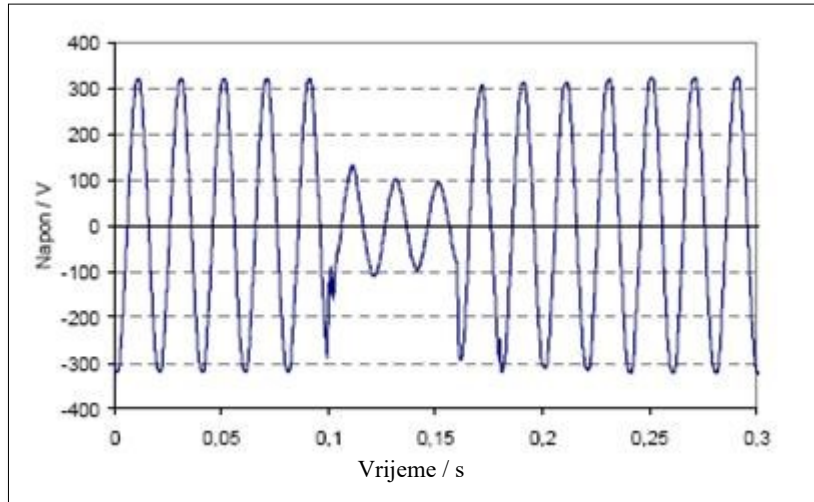
Graf 2. Primjer treperenja napona



Izvor: <https://energija.co.rs/tehnicki-parametri-elektricne-energije/>

Propad napona se definira kao privremeno smanjenje vrijednosti napona ispod unaprijed određene granice, odnosno nazivne vrijednosti. Te granice se kreću najčešće u opsegu od 90% do 1% nazivne vrijednosti. Propadi su najčešće uzrokovani kvarom u sustavu ili naglim povećanjem opterećenja. Uobičajeno se razvrstavaju po dubini i trajanju.

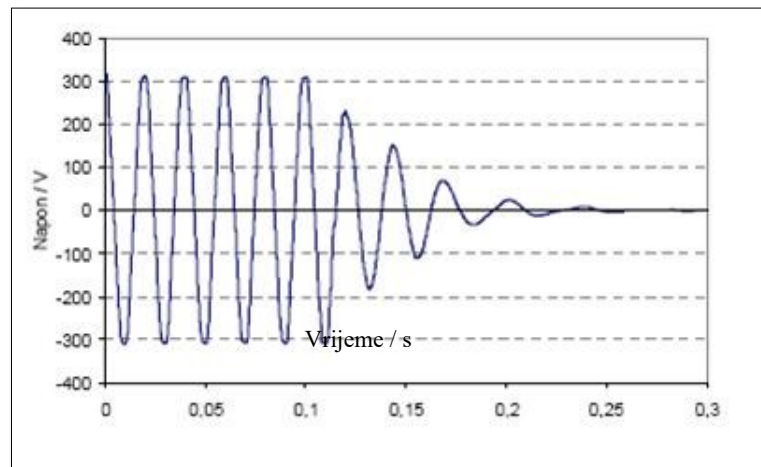
Graf 3. Primjer propada napona



Izvor: <https://energija.co.rs/tehnicki-parametri-elektricne-energije/>

Prekid napona je stanje mreže pri kojem napon jednostavno nestane. U većini preporuka smatra se da je nastupio prekid kada napon padne ispod 1% svoje nazivne vrijednosti. Prekidi se dijele na duge i kratke. U većini preporuka dugi prekid je definiran kao onaj trajanja dužeg od 3 minute. U ovu skupinu prekida napona, drugim riječima oni koji su vezani uz kvalitetu električne energije, ne spadaju unaprijed planirana i najavljena isključenja napajanja.

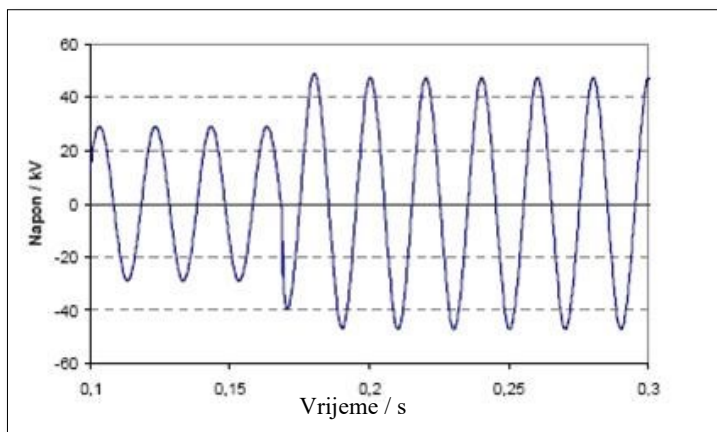
Graf 4. Primjer prekida napona



Izvor: <https://energija.co.rs/tehnicki-parametri-elektricne-energije/>

Prenapon je stanje pri kojem napon poraste preko neke unaprijed određene granice odnosno nazivne vrijednosti. Kratkotrajni prenaponi se u mreži javljaju u slučaju kvara ili su uzrokovani radom određenih uređaja i sklopova. Njihova vrijednost ovisi o načinu uzemljenja mreže.

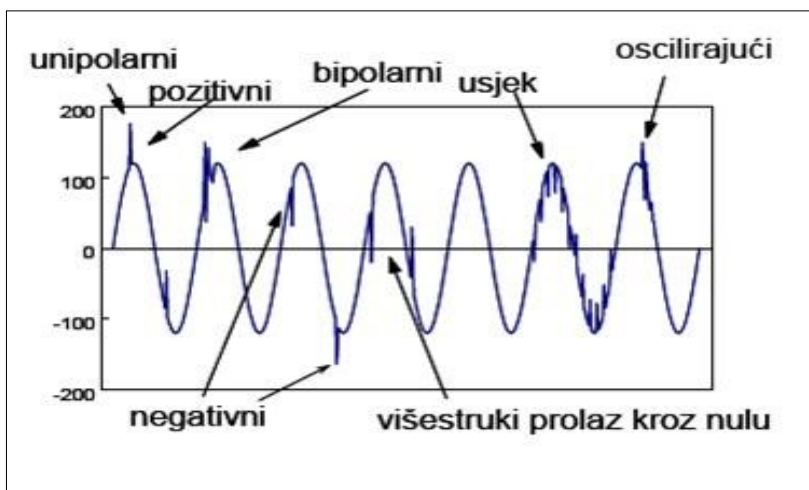
Graf 5. Primjer prenapona



Izvor: <https://energija.co.rs/tehnicki-parametri-elektricne-energije/>

Impulsni prenapon (tranzijent) je visokofrekvencijska pojava napona u trajanju kraćem od jedne poluperiode (10 ms). Mogu biti uzrokovani sklopnim operacijama u mreži, udarima groma, uklapajnim kapacitivnih tereta i dr. Oblici im mogu biti pozitivni, negativni, unipolarni, bipolarni, usjek, oscilirajući i višestruki prolaz kroz nulu.

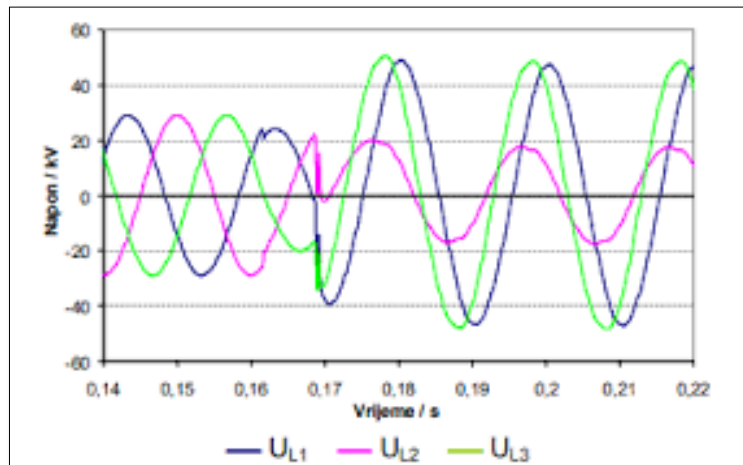
Graf 6. Primjer različitih vrsta tranzijenata



Izvor: <https://energija.co.rs/tehnicki-parametri-elektricne-energije/>

Nesimetrija napona se očituje kada se naponi u trofaznom sustavu međusobno razlikuju po iznosu (amplitudi) ili ako kut između pojedine dvije faze nije kut od 120° . Mjerilo asimetričnosti napona je definirano kao odnos inverzne i direktne komponente. Asimetrija u distribucijskim mrežama je uzrokovana neravnomjernom raspodjelom tereta po faza ili kvarom u sustavu.

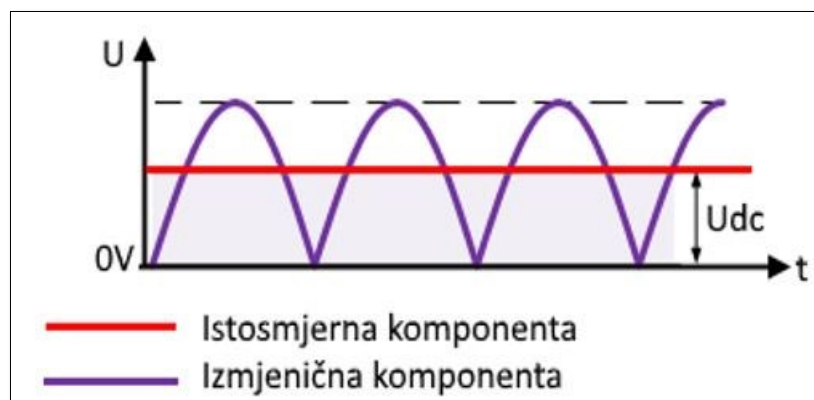
Graf 7. Primjer nesimetrije uzrokovane kvarom



Izvor: <https://energija.co.rs/tehnicki-parametri-elektricne-energije/>

Valovitost napona je promjena ili kolebanje struje ili napona oko istosmjerne komponente.

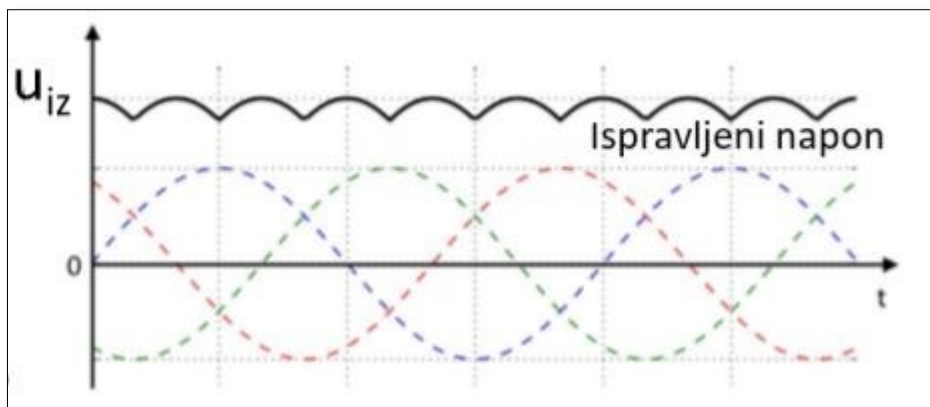
Graf 8. Primjer valovitosti napona



Izvor: Cuculić A., Energetska elektronika, prezentacija iz kolegija

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

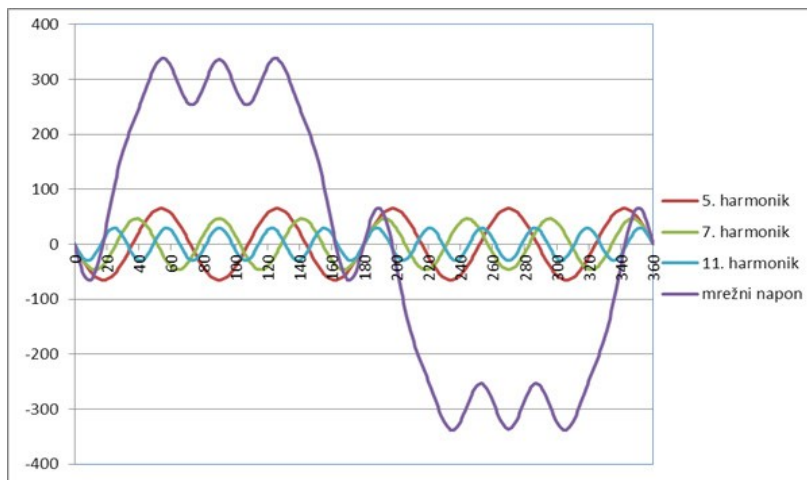
Graf 9. Primjer pulsnoeg broja u ispravljenom trofaznom naponu



Izvor: Cuculić A., *Energetska elektronika, prezentacija iz kolegija*

Naponi viših harmonika su efektivne vrijednosti sinusoida čije su frekvencije višekratnici (uglavnom neparni) osnovne frekvencije nesinusoidalnog napona. Visoke vrijednosti viših harmonika ukazuju na lošu kvalitetu električne energije pa su stoga nepoželjni u mrežama.

Graf 10. Primjer harmonički izobličenog naponskog vala



Izvor: Cuculić A., *Energetska elektronika, prezentacija iz kolegija*

Naponi međuharmonika ili necjelobrojni harmonici nisu višekratnici frekvencije osnovnog harmonika, ali u interferenciji s osnovnim harmonikom stvaraju relativno spore periodičke promjene u valnom obliku napona. Danas se u elektroenergetskoj mreži njihova stopa prisutnosti povećava zbog sve učestalije upotrebe statičkih pretvarača frekvencije.

Signalni naponi su naponi superponirani na osnovni naponski val, a koriste se za upravljanje trošilima i elektroničkom opremom. Kako se ne bi stvorio nepoželjan utjecaj na ostala trošila u sustavu, potrebno je uspostaviti kontrolu nad njima.³

2.1.1. Utjecaj harmoničkih izobličenja

Prvi ozbiljniji problemi vezani uz kvalitetu električne energije su se počeli javljati u elektroenergetskom sustavu broda implementacijom tiristorskih ispravljača za pogon palubnih elektromotora, a oni najznačajniji bili su očitani u pogledu:

- pregrijavanja električnih strojeva
- učestalih kvarova elektroničke navigacijske opreme
- povećanja buke i vibracija
- pogrešnih prorada električkih zaštita i alarmnih releja⁴

Kako snaga električne propulzije putničkog broda doseže i do nekoliko desetaka MW (megawat), tako i snaga njezinih pretvarača frekvencije koji su integrirani dio elektroenergetskog sustava broda, dovodi do većih izobličenja napona pa su problemi u cjelokupnom sustavu koji napaja i ostala trošila očitiji. Stoga, ne postoje električni uređaji kod kojih nema štetnog djelovanja viših harmonika. Postoje jako osjetljivi uređaji kod kojih se trenutno javljaju neispravnosti u radu što često dovodi do kvarova ili još gore ispadanja iz pogona. S druge strane, uređaji koji naizgled mogu raditi bez kvarova, vrlo lako mogu prekinuti svoje djelovanje puno prije predviđenog roka trajanja. Iz tog razloga, određeni elektroenergetski sustav može tolerirati harmoničko izobličenje

³ http://hpet.hr/kvaliteta_elektricne_energije/ (29.07.2023.)

⁴ Cuculić, A.: *Analiza harmoničkog izobličenja napona u glavnoj mreži*, Rijeka, 2020.

napona unutar određenih graničnih vrijednosti koje su određene stupnjem osjetljivosti priključenih električnih uređaja i propisima klasifikacijskih ustanova.

2.1.2. Propisi klasifikacijskih ustanova na izobličenje napona

Klasifikacijska su društva, na osnovi teoretskih istraživanja i praktičnih iskustava, donesla pravila i propise koja određuju najveća dozvoljena izobličenja napona u brodskoj mreži. IEEE i IEC kao dvije najznačajnije svjetske elektrotehničke organizacije, kontinuirano i intenzivno se bave izučavanjem kvalitete električne energije. Hrvatski registar brodova definira najviše dozvoljeno izobličenje napona mreže u okviru poglavlja o uređajima energetske elektronike pa je definirano i najveće dozvoljeno izobličenje napona:

„Koeficijent nelinearnog izobličenja napona brodske mreže K_u , uzrokovan radom uređaja energetske elektronike, ne smije preći 10%. Uređaji koji izazivaju izobličenje sinusnog oblika napona iznad navedene vrijednosti, mogu se koristiti samo u dogovoru s Registrom.“

THDu se računa kao srednja kvadratna vrijednost svih viših harmonika izražena u postotku vrijednosti osnovnog harmonika napona.

IEC-60092 norma koja obuhvaća brodske električne sustave propisuje da ukupno izobličenje napona THDu ne smije preći 5%, dok istovremeno svaki pojedinačni harmonik mora biti manji od 3% vrijednosti osnovnog harmonika. Klasifikacijska društva i IEC ne postavljaju nikakva ograničenja na harmonike struje dok kod IEEE to nije slučaj. Ona zahtijeva ograničenje ukupnog izobličenja struje svih trošila na 5%, a pojedinačnih harmonika:

- ispod 11. harmonika na 4%
- od 11. do ispod 17. harmonika na 2%
- od 17. do ispod 23. harmonika na 1.5%
- od 23. do ispod 35. harmonika na 0.6%
- od 35. i za sve više harmonike na 0.3%⁵

Na kopenim sustavima se primjenjuju ovako stroga ograničenja kako bi se zaštitilo distributera od jakih nelinearnih trošila koja izazivaju harmoničku distorziju napona mreže, dok s druge strane na brodskom sustavu gdje ne postoji sukob interesa djeluju pretjerana.

⁵ Cuculić, A.: *Analiza harmoničkog izobličenja napona u glavnoj mreži*, Rijeka, 2020.

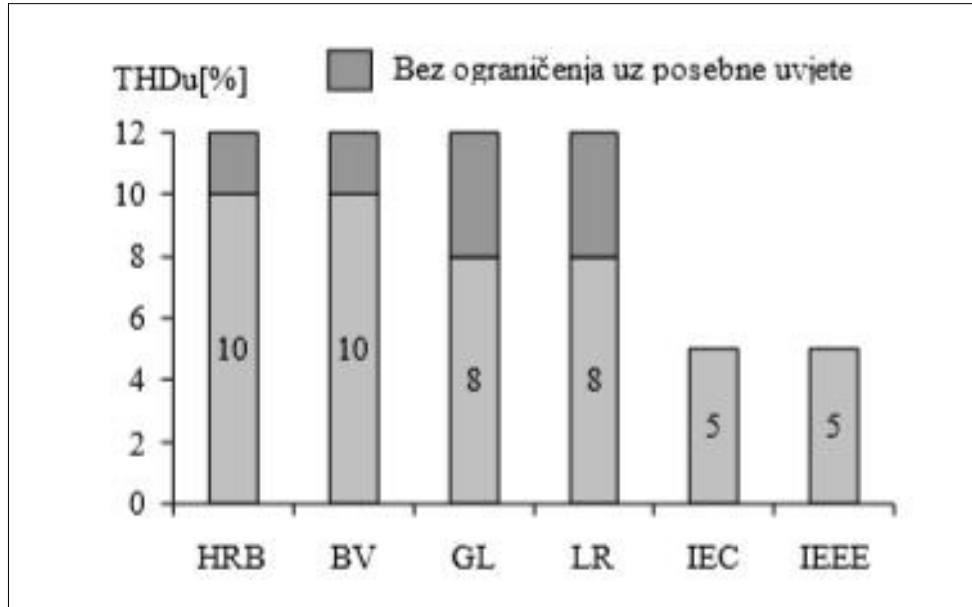
IEEE-519-1992 norma razlikuje tri vrste elektroenergetskih sustava: Sustave namijenjene samo napajanju statičkih pretvarača, sustave opće namijene i sustave specijalne namijene. Dozvoljene granične vrijednosti propada napona ΔU_N i THDu se na tim sustavima bitno razlikuju.

Tablica 1. Dozvoljene granične vrijednosti propada napona ΔU_N i THDu prema IEEE-519-1992 standardu

| IEEE-519-1992 | EES namijenjen frekvencije | isključivo pretvaračima | EES opće namijene | EES posebne namijene |
|---------------------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------|----------------------|
| Dozvoljeni propad napona ΔU_N | 50% | | 20% | 10% |
| Dozovoljeni TDHu | 10% | | 5% | 3% |

Izvor: Cuculić A., Analiza harmoničkog izobličenja napona u glavnoj mreži

Prema normi IEEE-519 na brodskim električnim sustavima visokog i niskog napona, THDu ne smije preći 5%, a svaki pojedini harmonik 3% vrijednosti osnovnog harmonika napona. Preporuke IEEE-a i IEC-a nisu obvezatne, ali ukazuju na potrebu tehničko-ekonomske analize isplativosti dodatnih investicijskih ulaganja i eventualnog smanjenja pouzdanosti zbog povećanja broja i složenosti električnih uređaja.



Slika 1. Ukupno dozvoljeno izobličenje napona THDu kod električne propulzije prema različitim normama klasifikacijskih društava

Izvor: Cuculić A., Analiza harmoničkog izobličenja napona u glavnoj mreži

Brodovi se u grade kako bi zadovoljili sve propise najbitnijih klasifikacijskih društava pa je u konačnici u ovom slučaju najbolje zahtijevati THDu ispod 8% na glavnoj rasklopnoj ploči, a na ostalim naponskim nivoima ispod 5%, te napone pojedinih harmonika ispod vrijednosti propisanih od svih značajnih registara, bez obzira na koju brod biti upisan. Također je bitno napomenuti da izobličenje napona jako ovisi o trenutnim odnosima između snage priključenih generatora, propulzije, linearne i nelinearne potrošnje pa se shodno tome mjerenje provodi u svim režimima eksploatacije.⁶

⁶ Cuculić, A., op.cit., str. 2-4

2.2. KLASIFIKACIJA NAPONSKIH VELIČINA

Definicija naponske veličine ili nivoa ovisi o kontekstu same primjene. Prema tome, prilikom klasificiranja napona, bilo da je riječ o „visokom“ ili „niskom“ naponu, ključnu determinantu čine dva pokazatelja: opasnost od strujnog udara i mogućnost izazivanja iskre u zraku. Razlika potencijala dvije referentne točke dvaju vodiča u sustavu ili između vodiča i „zemlje“ u praksi se podrazumijeva naponom. U električnim postrojenjima i aplikacijama, visokim naponom se smatra svaki izmjenični napon vrijednosti veće od 1000 V (volti). S druge strane, u elektroenergetskom inženjerstvu, visokim naponom se smatra u većini slučajeva onaj koji prelazi vrijednost od 35000 V. Prema pravilima registra u pomorskoj praksi, visokim naponom na brodu smatraju se svi naponi viši od 1000 V (1Kv), dok s druge strane, naponi ispod 1000 V smatraju se niskim naponom. Standardne vrijednosti visokog napona na brodu iznose:

- 3300 VAC 60 Hz
- 6600 VAC 60 Hz
- 11000 VAC 60 Hz
- 15000 VAC 60 Hz

Stoga, prilikom izbora odgovarajuće naponske razine potrebno je voditi brigu o: dimenziji generatora i pripadajućih trošila, veličini električnih strojeva i sklopnih postrojenja, jačini snage kratkog spoja te izvedivosti brodske opreme i sustava. Maksimalne dozvoljene vrijednosti napona na brodu iznose 15000 VAC (izmjenični napon) i 1000 VDC (istosmjerni napon).⁷

Glavna razlika između napajanja visokim i niskim naponom također se očituje u sljedećem:

- izolirana oprema mora biti uzemljena.
- pristup područjima visokog napona trebao bi biti strogo ograničen i kontroliran.
- postupci izolacije su složeniji.
- trebaju se formulirati i zabilježiti strategije prekida strujnog kruga.
- obavezno je koristiti specifične testne sonde i instrumente za visoki napon.
- dijagnostičko ispitivanje otpora izolacije je nužno.
- sustavi visokog napona obično imaju uzemljenu neutralu i koriste ograničenje struje.
- posebni prekidači visokog napona moraju biti instalirani⁸

⁷ Cuculić, A.: **Električni poriv broda**, skripta za kolegij, Rijeka, 2020.

⁸ <https://dieselship.com/marine-technical-articles/marine-electro-technology/high-voltage-systems-on-ships/> (14.08.2023.)

2.3. MJERE SIGURNOSTI ISPITIVANJA VISOKOG NAPONA

Prilikom rada s električnom strujom i naponom, stručno osoblje i radnici moraju se pridržavati mjera osobne zaštite kako bi spriječili opasnost odnosno vjerovatnost od pogotka strujnog udara. Prema tome, bitno je pridržavati se sljedećih smjernica:

- **Nositi cipele s gumom potplatom** kako bi se spriječio strujni udar preko stopala.
- Nositi **suhi odjeću** kao dobar izolator koji sprječava slučajan kontakt s dijelovima pod naponom.
- Koristiti **plastičnu zaštitnu kacigu** radi zaštite glave i sprječavanja ozljeda u slučaju pada.
- Koristiti **gumene ili suhe kožne rukavice** prilikom rada pod naponom kada nije moguće isključiti strujni krug.
- Koristiti **gumenu prostirku** za klečanje, ležanje ili sjedenje ako pod nije električki izoliran.
- **Postaviti oglasne ploče i znakove upozorenja** na bitnim mjestima radi signalizacije prisutnosti napona i mogućeg strujnog udara.
- **Osigurati se vezivanjem** prilikom rada na visini kako bi se spriječili gubitak ravnoteže i potencijalno smrtonosni pad.
- Koristiti **alat s izoliranim drškama** koje su testirane na odgovarajući napon.
- **Isključiti strujni krug s napajanja kad god je to moguće.**
- **Koristiti električno izolirane ručke alata prilikom ispitivanja.**
- Tijekom timskog rada **raspravljati o postupcima, rizicima i opasnostima ispitivanja.**
- **U slučaju nepoznavanja sustava** i nedostatka sigurnosti, **zatražiti pomoć** pri ispitivanju.
- **Osigurati da ne postoji mogućnost hotimičnog uključanja**, izvaditi osigurače, zaključati sklopke ili prekidače te blokirati automatiku.
- **Obavijestiti sve** relevantne osobe **o vrsti rada koji se obavlja**, posebno one koji imaju mogućnost daljinskog hotimičnog uključanja uređaja na kojem se radi.

- **Provjeriti napon uređaja prethodno provjerenim voltmetrom ili ispitivačem s dvije žice prije prvog kontakta s strujnim krugom**, a ne koristiti kućne ispitivače napona poput odvijača.
- **Pri pružanju pomoći unesrećenom, isključiti napajanje** ako je moguće, a ako nije, koristiti izolatore poput suhих rukavica, komada suhe odjeće ili cipele kako bi se izbjegao dodir s vodičima pod naponom.
- **Provjeriti da je prostor dobro ventiliran** kako bi se izbjegao gubitak svijesti uslijed nedostatka svježeg zraka.
- Prije rada **ukloniti nakit** i druge osobne vodljive predmete.
- **Prilikom rada u uskim i skućenim prostorima** uvijek **imati drugu osobu** kao sigurnosnu mjeru u slučaju nezgode.
- **Za ispitivanje i kontrolu obavezno koristiti samo ispravne, kalibrirane instrumente** koji su certificirani od strane službeno priznatih akreditiranih ispitnih laboratorija za umjeravanje i kalibraciju instrumenata.⁹

Istovremeno, u radu s visokonaponskim sustavima, važno je razumjeti faktore koji mogu povećati rizik od električnog šoka. Ti faktori često uključuju:

- veći rizik kada se radovi s visokim naponima obavljaju blizu osoba koje nisu upoznate s opasnostima visokih napona pa je potrebno osigurati područje od okolnih neelektričnih aktivnosti te postaviti sigurnosne oznake
- ispitivanje izolacije visokog napona (tzv. ispitivanje bljeskom) može biti posebno opasno kada se dijelovi opreme napaja tijekom određenog vremenskog razdoblja
- visokonaponska oprema koja za svoj rad koristi vodu povećava rizik od opasnosti
- korištenje testnih instrumenata za mjerenje visokih napona može povećati rizik od ozljeda ako zaštitni vodič za uzemljenje nije ispravno spojen, a za posljedicu može dovesti kućište instrumenta pod napon vrlo opasne razine
- pohranjivanje energije čak i nakon što je isključena visokonaponska ploča (npr. na 11 kV razvodnoj ploči, smrtonosni rezidualni kapacitivni naboj može ostati prisutan satima ili čak danima nakon isključenja)

⁹ Vučetić, D.: **Brodski električni sustavi**, skripta za kolegij, Rijeka, 2015.

Prilikom rada s visokonaponskom opremom i sustavima, važno je zapamtiti kraticu DIE:

- Isključi (**D**isconnect)
- Izoliraj (**I**solate)
- Uzemlji (**E**arth).¹⁰



Slika 2. Sigurnosna oprema i alati prilikom rada na električnom sustavu

Izvor: https://yourfreesm.xyz/product_details/29801078.html

¹⁰ Cuculić, A: **Primjena visokog napona na brodu**, skripta za kolegij Električni poriv broda, Rijeka, 2019.

2.4. PRAVILA RUKOVANJA VISOKONAPONSKIM SUSTAVOM

Za visoki napon vrijede stroži propisi i standardi kako bi se maksimalno smanjila mogućnost grešaka, kako električne opreme, tako i opasnost za posadu na brodu. Važno je naglasiti da svi sudionici u lancu od zapovjednog do izvršnog člana posade moraju biti potpuno koncentrirani i dobro prekontrolirati sve predviđene korake u izvedbi zadatka, a to se najviše odnosi na **izolaciju** i **uzemljenje** strujnog kruga na kojem će operacija biti izvršena.

2.4.1. Opći sigurnosni standardi

Brodovi opremljeni visokonaponskim mrežama se razlikuju od većine brodova koji koriste niskonaponske mreže na nekoliko važnih načina. Primarno, ti brodovi nemaju glavnu sabirnu (rasklopnu) ploču smještenu u kontrolnoj sobi brodske strojarnice, što je uobičajeno za većinu drugih brodova. Umjesto toga, glavna ploča se nalazi u posebnoj prostoriji koja je strogo kontrolirana i pristup je dozvoljen samo ovlaštenim osobama. U većini slučajeva, ulaz u tu prostoriju je zaključan.

Vrata prostorije koja sadrži visokonaponske uređaje, koji nisu smješteni unutar ormara ili vrata ormara, moraju biti blokirana dok su uređaji pod naponom ili dok nisu uzemljeni. Visokonaponski uređaji, čiji je napon veći od 1 kV, ne smiju biti ugrađeni u isto kućište kao niskonaponski uređaji, osim ako se ne poduzmu posebne mjere kako bi se osigurao siguran pristup niskonaponskom dijelu. Istodobno, kabeli različitih naponskih nivoa (visokonaponski i niskonaponski) ne smiju biti položeni u istu kabelsku trasu. Prilikom prolaska kabela kroz nastambe, kabeli se provlače kroz zatvorene prolaze i moraju biti jasno označeni, obično crvenom bojom. Kabelski završetci moraju biti pravilno učvršćeni kako bi se zaštitili od prodora vode. Ujedno, treba postojati mogućnost odvajanja visokonaponskog glavnog rasklopnog uređaja u najmanje dvije neovisne sekcije, pri čemu svaka sekcija treba biti napajana od barem jednog visokonaponskog generatora.

Nadalje, mora postojati mogućnost odspajanja zvjezdista generatora od trupa kako bi se generator mogao odvojiti za potrebe održavanja i mjerenja otpora izolacije. Bitno je voditi računa o propisanim minimalnim zračnim razmacima između faza i prema masi, ovisno o naponskom nivou (npr. za 3.3 kV minimalni razmak je 55 mm, za 6.6 kV je 90 mm, a za 11 kV je 120 mm).

Kako se niskonaponski elektroenergetski sustav broda napaja iz visokonaponske mreže putem visokonaponskih transformatora, kao što je npr. 11 kV/690 V, on mora biti zaštićen od prenapona koji bi se mogli javiti prilikom direktnog ili indirektnog kontakta između primarnog (visokonaponskog) i sekundarnog (niskonaponskog) namota transformatora. Takva zaštita se može postići kroz direktno uzemljenje zvjezdišta sekundarnog namota, uzemljenje zaštitnim plaštem između primarnog i sekundarnog namota ili korištenjem odgovarajuće prenaponske zaštite.¹¹

2.4.2. Sigurnosne procedure

Službeni dokument koji omogućuje obavljanje radova na postrojenjima i uređajima visokog napona unutar jasno definiranog vremenskog intervala naziva se *Electrical Permit to Work (EPTW)*. Dokument mora biti jasno proučen, planiran i odobren od ovlaštenog elektro časnika za sigurnost, a zadatak treba izvršiti odgovorna i za to obučena osoba. Dozvola za rad s visokim naponom obično se sastoji od pet dijelova:

1. Najprije se utvrđuje vrsta zadatka koji se mora obaviti, a ovlaštena osoba koja će izvoditi radove na sustavu potpisuje dokument.
2. Procjena opasnosti (*Risk Assessment*) definira na kojim mjestima treba izolirati i uzemljiti sustav te gdje treba postaviti ploče upozorenja (*danger/caution*). Ovaj dokument potpisuje glavni elektro časnik ili upravitelj stroja.
3. Odgovorna osoba za postavljeni zadatak potpisuje izjavu da je zadovoljna s mjerama opreza i da je visokonaponski krug bio izoliran i uzemljen.
4. Izvještaj o obavljenom zadatku ili odustajanju od istog potpisuje osoba odgovorna za postavljeni zadatak.
5. ETPW se poništava sa potpisom odgovorne osobe koja ga je izdala. Inače, bez poništenja ETPW vrijedi samo 24 sata.¹²

¹¹ <https://www.slideshare.net/MohammudHanifDewan/safeties-applications-of-high-voltage-in-ships> (25.7.2023)

¹² ABB grupa: *Code of practice – Marine & Ports*, 2015.

Iako postoje dobro razređene sigurnosne procedure, ETPW se ne smije shvaćati kao rutinsko ispunjavanje administrativnog spisa niti po njegovim uputama. Ispunjavanje dokumenta predstavlja priliku za ispunjavanje svih sigurnosnih mjera koje treba poduzeti prije detaljnog upoznavanja sa zadatkom. Iz tog razloga, bitno je pridržavati se sljedećih pravila:

- 1) Jasno definirati zonu sigurnosnog rada
- 2) Razumjeti konfiguraciju električne instalacije (točke napajanja, odvajanja i uzemljenja)
- 3) Osobno provjeriti metode izolacije (isključivanja) strujnog kruga i uzemljenja
- 4) Dužnost svih časnika je razumijevanje postavljenog zadatka i mjera sigurnosti
- 5) Ne smije se započeti s radom bez važeće dozvole
- 6) Prije početka rada provjeriti listu svog alata i rezervnih dijelova sustava
- 7) Točno slijediti propisanu proceduru osiguranja mjesta rada
- 8) Korektno i savjesno provjeriti da nema napona.
- 9) Provjera se isključivo vrši visokonaponskim ispitivačem napona.
- 10) Prije svake upotrebe ispitivač treba testirati.
- 11) Prvo se spoji stezaljka na masu, a potom se sa štapom takne stezaljka koja se provjerava.
- 12) Uzemljiti sustav.
- 13) Odgovorna osoba ne smije napustiti lokaciju dok se posao ne završi, a zatim napravi provjera popisa alata.
- 14) Za rad na visokom naponu moraju biti prisutna najmanje dva člana posade od kojih je jedna odgovorna osoba koja se primarno i isključivo brine za sigurnost lokacije i provjerava osobu koja vrši zadatak na sustavu.
- 15) Svi moraju proći obuku rada na visokom naponu i potpuno biti uključeni u posao i mjere zaštite.¹³

¹³ Cuculić, A.: **Procedure iskapčanja visokog napona na brodu**, Rijeka, 2020.



Slika 3. Visokonaponski ispitivač

Izvor: ABB priručnik

Od velike je važnosti spomenuti da nikakvi drugi radovi i mjerenja nisu dozvoljeni dok sustav nije uzemljen, osim provjere visokonaponskim ispitivačem električnog kruga da slučajno nije pod naponom. Čovjek ne smije ni u kojem slučaju dotaknuti fazne vodiče niti se približiti istima dok sustav nije uzemljen bez obzira što je isključen s napajanja.

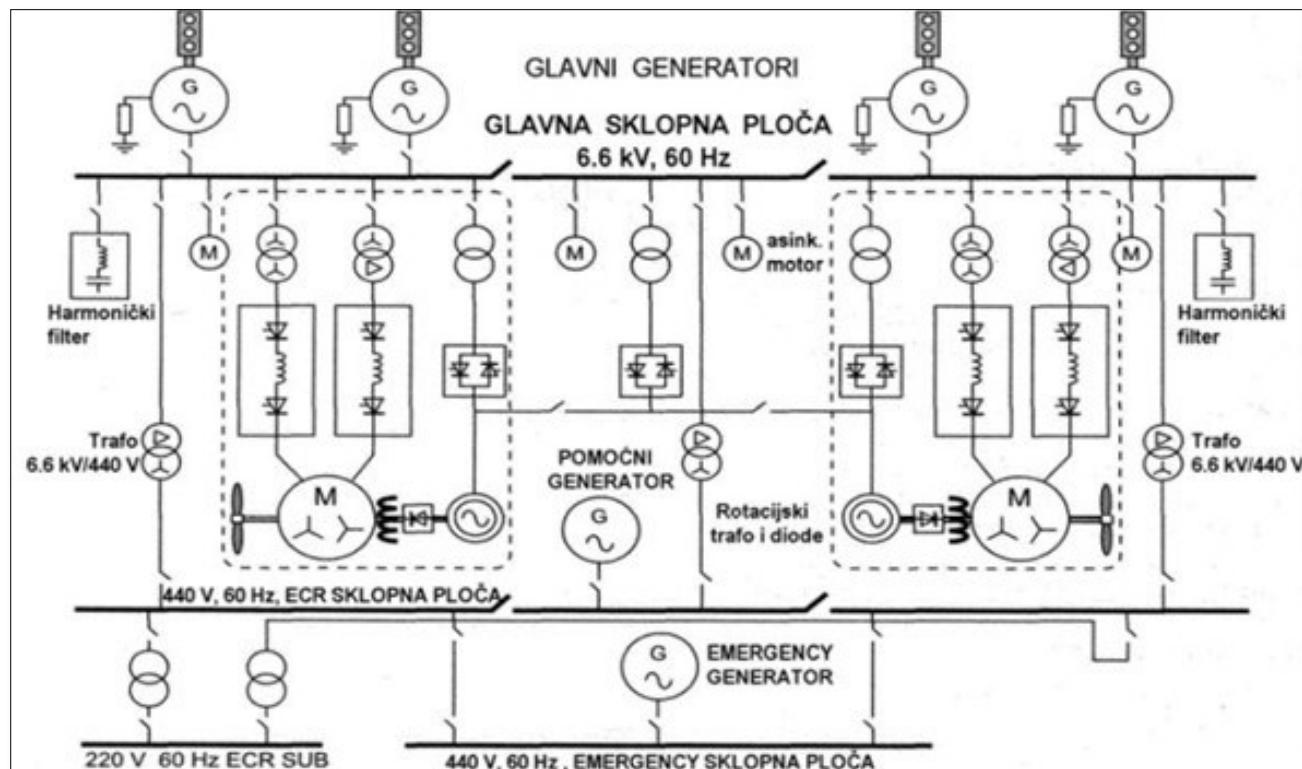
3. ELEKTROENERGETSKI SUSTAV PUTNIČKOG BRODA

Sa sve većim napretkom tehnologije, moderni putnički brodovi postaju kompleksniji, sigurniji i učinkovitiji nego ikad prije. U narednom tekstu će biti opisati glavni i pomoćni električni sustavi koji se koriste na suvremenim putničkim brodovima. Analizirat će se ključne komponente i tehnologije u tim sustavima te njihovu ulogu u sigurnom i učinkovitom funkcioniranju broda. Na brodu se električna energija proizvodi u električnim centralama pomoću pojedinačnih dizel-generatora, dok se manja količina energije osigurava se putem akumulatorskih baterija i generatora za nuždu. Dimenzioniranje izvora električne energije na brodu određeno je bilancom električne energije. Instalirana snaga izvora računa se uzimajući u obzir različite načine rada broda, kao što su plovidba i manevar, kapacitet putnika i posade, tonaža i duljina broda i slično. Proračun izvora električne energije na brodu, temelji se na tehničkim i iskustvenim podacima, uključujući instaliranu snagu potrošača, faktor istodobnosti, vjerojatnu vršnu snagu itd. Sve ove informacije uzimaju u obzir dopušteni pad napona i gubitke u brodskoj mreži. Zahvaljujući novim konstrukcijama sinkronih generatora s brзом regulacijom napona, u današnje brodove se ugrađuju veliki i jednostavni indukcijski motori koji pokreću gotovo sve mehanizme.

Stoga, brod općenito možemo promatrati kao cjelovit, usklađen i zatvoren električni sustav koji uključuje izvore energije i mjesta potrošnje, te komponente koje ih povezuju, spajaju, prekidaju, reguliraju i štite, dok istovremeno upravljaju njima. On objedinjuje električnu i mehaničku opremu koja služi za stvaranje, distribuciju, prijenos i korištenje električne energije. Cijeli električni sustav čini jedinstvenu cjelinu, no radi lakše preglednosti može se razdijeliti na četiri osnovna podsustava:

- Generiranje električne energije (uključuje električnu centralu, dizel-generatore, akumulatorske baterije, generator za nuždu, električne pretvarače).
- Rasklopni sustav (obuhvaća glavnu rasklopnu ploču, ploču za rasvjetu, rasklopnu ploču za nuždu itd.).
- Distribucija i prijenos električne energije (sadrži kabelsku mrežu, uređaje za razdjeljivanje snage i osvjetljenja)
- Potrošnja električne električne energije (uključuje elektromotorne pogone, grijače, pumpe, rasvjetu i slično).¹⁴

¹⁴ Vučetić, D.: **Brodski električni sustavi**, skripta za kolegij, Rijeka, 2015.



Slika 4. Brodski visokonaponski sustav električne propulzije

Izvor: Boras V., Brodska visokonaponska tehnika

3.1. IZVORI ELEKTRIČNE ENERGIJE

Električna centrala predstavlja srce električnog sustava na brodu, sastavljeno od skupa agregata i potrebne opreme koja omogućuje njihov rad i funkcionalnosti za upravljanje i kontrolu. Agregati uključuju dizelski motor i električni generator (alternator) zajedno s pripadajućom opremom. Važni sklopovi za regulaciju frekvencije, regulaciju napona, praćenje opterećenja, raspodjelu opterećenja te zaštitu motora i generatora moraju osigurati sigurnu, kvalitetnu i stabilnu proizvodnju električne energije. Na brodovima se instaliraju primarni i sekundarni izvori električne energije. Primarni izvori su generatori koji opskrbljuju električnom energijom sve električne uređaje na brodu putem glavne sklopne ploče u uvjetima normalne plovidbe. Sekundarni izvori električne energije, poznati kao rezervni izvori, aktiviraju se kada nestane električna energija na glavnoj sklopnoj ploči ili kada je potrebno napajanje određenog uređaja na brodu iz posebnog izvora. Svaki brod mora imati najmanje dva primarna izvora. Obično su to generatori, pri čemu barem jedan od njih mora imati vlastiti neovisni pogon.

3.1.1. Dizel-generatori

U skladu s vrstama pogonskog stroja broda, brodske generatore obično dijelimo na dizel-generatore, turbo generatore i osovinske generatore. Ipak, najčešće korišten izvor energije na putničkim brodovima je generator s sinkronim pogonom, gdje se dizelski motor koristi kao pogonska snaga. Uobičajeno se koriste samouzbudni sinkroni generatori bez četkica, koji imaju naglašene polaritete na rotoru. Ovi generatori su pokretani srednjeokretnim dizelskim motorima, a preko zajedničke električne centrale opskrbljuju cjelokupne energetske potrebe broda. Razlog odabira srednjehodnih ili brzohodnih dizelskih motora je njihova manja veličina i niža cijena u usporedbi sa sporohodnim motorima iste snage, koji se često koriste kod direktnog pogona. Prijenos snage između osovine dizelskog motora i generatora obično se ostvaruje izravno, bez upotrebe reduktora. Kod samouzbudnih generatora bez četkica, energija potrebna za poticanje generira se na rotoru putem elektromagnetske indukcije, dok se ispravljanje struje odvija na samom rotoru putem diodnog mosta koji se rotira zajedno s rotorom. Jačina struje za uzbudu kontrolira se automatskim regulatorom napona (*Automatic Voltage Regulator*), smještenim izvan generatora ili unutar njegovog statorskog dijela. Uređaj za uzbudu je koncipiran kao inverzni sinkroni generator, s uzbudom na statorskom dijelu i armaturom na rotoru.

Ključne prednosti korištenja dizelskih motora kod generatora su brza spremnost za rad, mogućnost precizne regulacije brzine i visoka efikasnost. No, postoje i nedostaci, kao što su oscilacije energije i stvaranje vibracija zbog elastičnosti osovine, te nepravilni okretni moment koji postaje izraženiji što je manji broj cilindara motora. Da bi se ublažile elektromehaničke oscilacije izazvane ovim nedostacima, može se primijeniti prigušni namot na generatoru.

Brzina vrtnje dizel motora određena je frekvencijom f (60 Hz) i brojem pari polova korištenog generatora prema formuli za sinkronu brzinu:

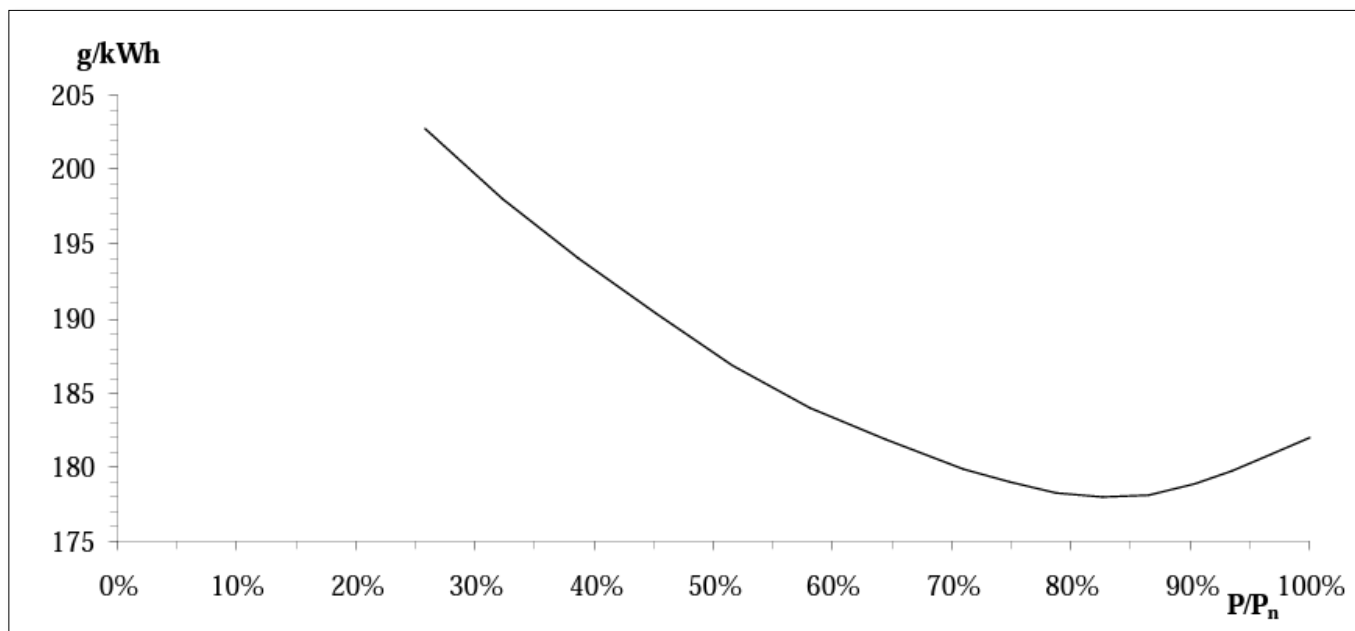
$$n_s = (60 \times f) / p$$

prema kojoj je:

- n = broj pari polova generatora
- f = frekvencija induciranog napona na stezaljkama generatora
- p = broj pari polova generatora.

Standardna brzina rotacije dizel motora za glavne sinkrone generatore pri frekvenciji od 60 Hz može iznositi 400, 514 ili 600 RPM (*eng. Rotation per minute*) dok za manje generatore poput onih za nuždu iznositi će 900, 1200 ili 1800 RPM-a.¹⁵

Suvremeni dizelski motori iskorištavaju otprilike 40% energije sadržane u gorivu, što predstavlja značajnu učinkovitost u usporedbi s drugim toplinskim strojevima. Učinkovitost dizelskih motora ovisi o opterećenju i eksponencijalno opada kada opterećenje padne ispod 50% nazivne snage, što je vidljivo iz prikaza specifične potrošnje na dijagramu. Pri malom opterećenju, sagorijevanje smjese nije potpuno, što rezultira stvaranjem čađe, sumpornih (SOx) i dušičnih (NOx) spojeva. To uzrokuje povećane emisije štetnih plinova i češće potrebno održavanje. Zbog toga je iznimno bitno optimalno upravljati proizvodnjom električne energije na brodu. Bilo da su generatori samostalni ili u paralelnom radu, važno je da tijekom cijelog vijeka upotrebe broda rade što više vremena unutar optimalnog raspona iskoristivosti, odnosno pri opterećenju od 60-90% (slika 5). Ovaj optimalni raspon postiže se prilikom dizajniranja bilance snage.¹⁶



Slika 5. Karakterističan dijagram specifične potrošnje goriva dizel-generatora

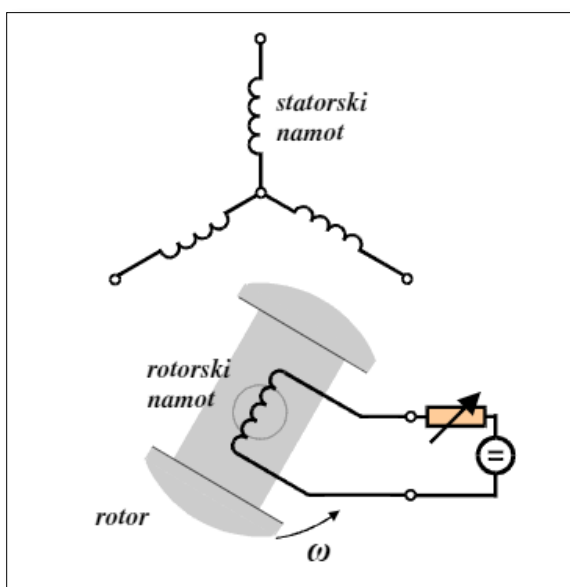
Izvor: Vučetić, D.: Brodski električni sustavi, skripta za kolegij, Rijeka 2015.

¹⁵ Giuffrida, M.: **Electrical Plants and Electric Propulsion on Ships**, 2019.

¹⁶ Vučetić, D.: **Brodski električni sustavi**, skripta za kolegij, Rijeka, 2015.

Posebna stanja generatora se odnose na specifične uvjete u kojima se prilikom rada može naći, a ta stanja imaju posebne karakteristike i posljedice na njegovo djelovanje:

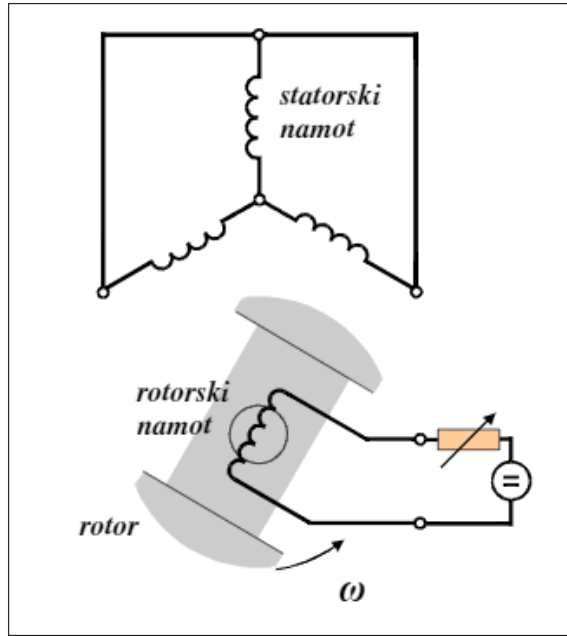
- **Prazni hod:** stanje kada su stezaljke rotora otvorene i kada nema struje koja teče kroz navoj armature. Veličina generiranog napona osim o specifičnostima uređaja i brzini rotacije, ovisi jedino o intenzitetu magnetskog polja u zračnom prostoru između statora i rotora. Intenzitet magnetskog polja može se regulirati putem struje kojom se generira. Proračunom snage u praznom hodu možemo odrediti koliko snage se troši na gubitke u jezgri željeza i trenje u ležajevima.



Slika 6. Sinkroni generator u praznom hodu

Izvor: Mandić, Tomljenović, Pužar: Sinkroni i asinkroni električni strojevi, Zagreb, 2012.

- **Kratki spoj:** stanje kada su stezaljke generatora kratko spojene bez otpora ili opterećenja. To rezultira izuzetno niskim otporom u strujnom krugu i ogromnom strujom koja prolazi kroz generator jer napon padne na nultu vrijednost.



Slika 7. Sinkroni generator u kratkom spoju

Izvor: Mandić, Tomljenović, Pužar: Sinkroni i asinkroni električni strojevi, Zagreb, 2012.

Prazan hod i kratki spoj su oba posebna stanja koja se žele izbjeći ili kontrolirati u normalnom radu generatora i električnih sustava. Kratki spoj posebno može uzrokovati oštećenje generatora, tjelesne opekotine i čak požar ako se ne prepozna i ne rješava brzo. Važno je da se generatori i električni sustavi projektiraju i koriste na način koji minimalizira rizik od takvih posebnih stanja kako bi se osigurala sigurnost i pouzdanost rada.

S druge strane, kada su stezaljke generatora priključene da opterećenje, električna struja prolazi kroz namot armature i svojim prolaskom stvara magnetski tok koji je suprotan toku magnetskog polja u zračnom rasporu u toj situaciji. Ovime dolazi do smanjenja induciranog napona. Kako bi se postigao nazivni napon mreže na izlazu generatora pod određenim opterećenjem, uzbuda generatora mora osigurati veći induciran napon nego što je njegov iznos pri praznom hodu. Stoga, kod opterećenja generatora, kombinacija nazivnog napona mreže i padanja napona na sinkronoj reaktanciji rezultira potrebnim induciranom naponom unutar stroja.¹⁷

Generatori na putničkim brodovima sa visokim naponom često koriste zvjezdište uzemljeno preko velikog otpora. Otpor između zvjezdišta generatora i mase broda dimenzionira se pažljivo

¹⁷ Mandić, Tomljenović, Pužar: **Sinkroni i asinkroni električni strojevi**, Zagreb, 2012.

kako bi se osiguralo da struja zemnog spoja ne pređe 20 A. Cilj je minimizirati struju, no njezin intenzitet ovisi o osjetljivosti zemnospojnih zaštita koje brzo isključuju dio mreže u slučaju problema.

Tehnički gledano, postoji dva načina za ostvarivanje uzemljenja zvjezdišta generatora na brodovima sa visokim naponom. Prvi pristup uključuje uzemljenje armaturnih (statorskih) namota svakog generatora putem otpornika. Druga opcija uključuje ugradnju transformatora u spoju zvijezda/otvoreni trokut u jedno od polja glavne rasklopne ploče. Takvi strujni mjerni transformatori smješteni su u svakom napojnom (feeder) polju, generatorskom polju i polju otpornika za uzemljenje.

U oba pristupa, zemni spoj se detektira putem rezidualnih napona i/ili struja u mreži. Rezidualni napon označava neujednačenost napona između faza i mase te ukazuje na prisutnost zemnog spoja. Ako ne postoji zemni spoj, kapacitivne struje kroz sve tri faze su simetrične, što rezultira nulom vektorske sume:¹⁸

$$L1\angle 0^\circ + L2\angle 120^\circ + L3\angle 240^\circ = 0$$

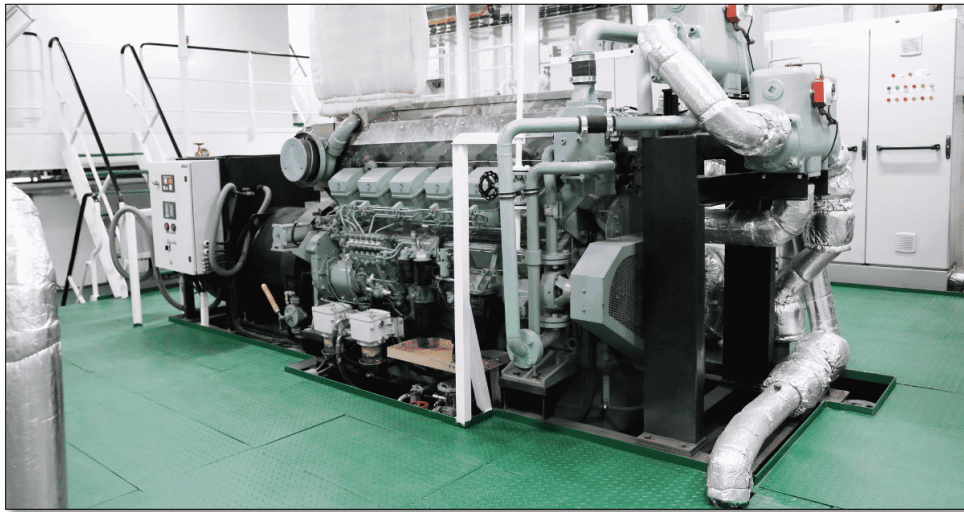
3.1.2. Generator za nuždu

Ovdje je riječ o malom zasebnom dizel generatoru koji opskrbljuje električnom energijom nužne terete odnosno trošila u slučaju kvara glavnog izvora napajanja:

- radio i navigacijska oprema
- kormilarski uređaj
- pozicijska , navigacijska i signalna svjetla
- rasvjeta za nuždu
- interne komunikacijske veze
- protupožarni sustavi
- alarmni sustavi
- presudne pumpe u strojarnici

¹⁸ Cuculić, A. : **Električni poriv broda**, skripta za kolegij, Rijeka, 2019.

Nalazi se izvan glavnog i pomoćnog strojnog prostora u nagrađu broda i ne nalazi se ispred glavnog zaštitnog zida. Ima vlastiti razvodni ormarić u blizini. Opremljen je neovisnim sredstvima za automatsko pokretanje (startanje pomoću zraka, elektropokretač ili pneumatski motor) kako bi se osigurao trenutni rad nakon prekida glavnog napajanja, a startanje se može ponoviti najmanje 3 puta, dok se dodatni pokušaj može napraviti unutar 30 minuta. Osiguran je dostatan i neovisan izvor goriva s temperaturom paljenja od najmanje 43 °C. Mora biti u mogućnosti pokrenut pri niskim temperaturama do nule (0 °C).¹⁹



Slika 8. Generator za nuždu

Izvor: <https://www.marineinsight.com/tech/generator/ways-of-starting-and-testing-emergency-generator/>

3.1.3. Sustav besprekidnog napajanja (UPS)

Baterijski sustav, poznat i kao sustav neprekidnog napajanja (engl. "UPS") na brodu, ima svrhu osigurati napajanje glavne sklopne ploče i pripadajućih kontrolnih krugova, navigacijskih svjetala, svjetla za hitne slučajeve, alarmnog sustava, protupožarnog sustava, zvučnih sirena te internih komunikacija. UPS uvijek radi kontinuirano. U normalnim uvjetima, potrošači se napajaju iz brodske električne mreže. Kada dođe do prekida u broskom električnom sustavu, ključni potrošači će biti prebačeni na baterijski sustav, koji će osigurati potrebnu energiju sve dok se

¹⁹ <https://www.marineinsight.com/tech/generator/ways-of-starting-and-testing-emergency-generator/> (4.6.2023.)

normalan mrežno napajanje ne uspostavi. Prema načinu djelovanja, besprekidne izvore napajanja dijelimo prema kontinuiranom načinu rada ili prema pričuvni.

Kada se koristi kontinuirani način rada, izmjenični napon iz mreže prvo se pretvara u istosmjerni napon. Taj istosmjerni napon koristi se za punjenje baterije u jednom smjeru, dok u suprotnom smjeru ulazi u pretvarač. Pretvarač potom generira izmjenični napon iz mreže koji se koristi za napajanje potrošača. S druge strane, u pričuvnom načinu rada, izmjenični napon iz mreže direktno opskrbljuje potrošače. Istovremeno, taj napon se pretvara u istosmjerni napon pomoću ispravljača kako bi se napunio baterijski sustav. Kada nestane mrežnog napajanja, prekidač prekida vezu s mrežnim izvorom i prebacuje se na baterijske izvore koji putem pretvarača opskrbljuju potrošače unutar mreže.

Akumulatori se postavljaju u akumulatorsku stanicu koja zahtijeva dobru ventilaciju kako bi omogućila ispuštanje eksplozivnih plinova poput vodika koji se generiraju tijekom punjenja. Police na kojima se postavljaju akumulatori trebaju biti prekrivene bojom otpornom na elektrolit. Smještaj akumulatora treba omogućiti jednostavno povezivanje (kraće i ravne spojnice) i smanjiti mogućnost kratkog spoja na najmanju moguću mjeru. Punjač akumulatora i pripadajuća električna oprema ne bi smjeli biti smješteni u istom prostoru s akumulatorima. Alkalni i olovni akumulatori ne bi trebali biti smješteni zajedno. Prekidač za svjetlo uvijek bi trebao nalaziti izvan akumulatorske stanice, s vanjske strane. Glavne smjernice kod održavanja akumulatora se odnose na slijedeće:

- neizostavno korištenje sigurnosne opreme: radno odijelo, naočale, rukavice
- gornja površina mora se održavati čistom i suhom
- redovito provjeravanje gustoće elektrolita i dolijevanje destilirane vode
- za sprječavanje oksidacije kontakata, provjeriti zategnutost stezaljki i premazati iste vazelinom
- u slučaju neispravnosti baterije, istu zamjeniti ispravnom

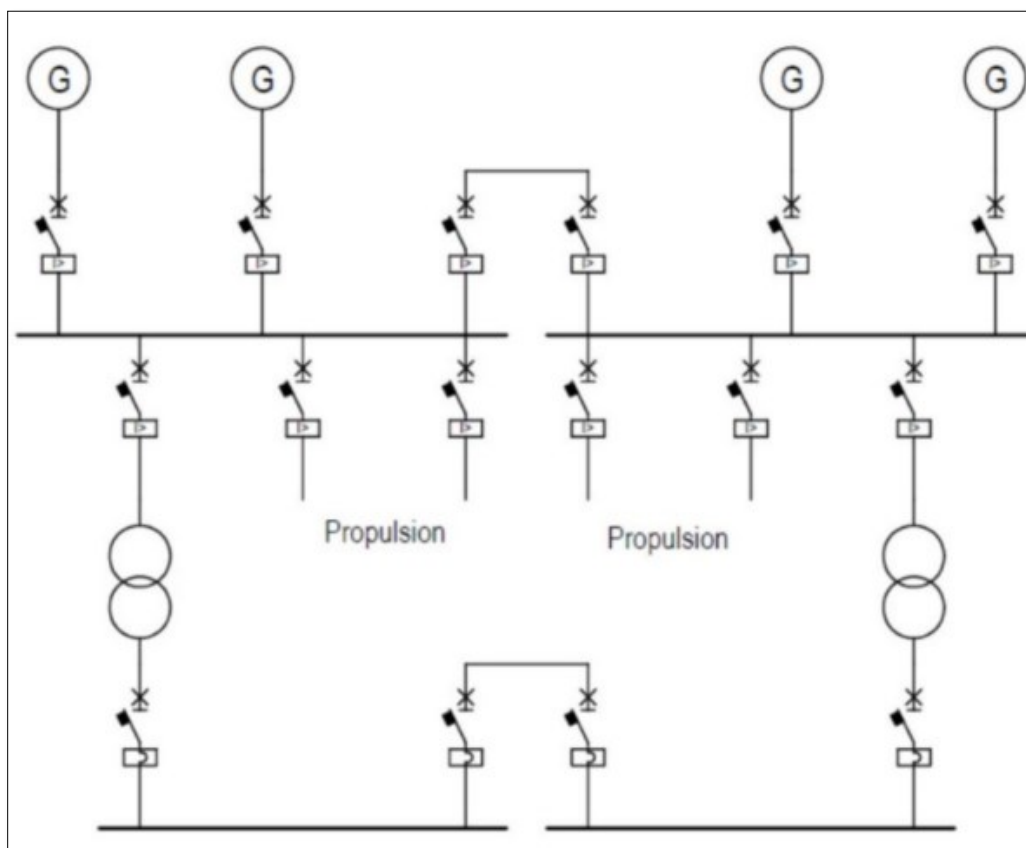
Provjera ispravnosti akumulatora obavlja se na 3 načina:

1. Najpouzdaniji način ispitivanja akumulatora je provjera napona pod opterećenjem. To se postiže spajanjem pojedine ćelije ili cijele baterije na vilicu koja je paralelno povezana sa snažnim žičanim ili limenim otpornikom male otpornosti. Tijekom ovog postupka, voltmetar se koristi kako bi se očitao napon, uz prolazak značajne struje koja odgovara snazi baterije (obično oko 100A). Važno je da očitavanje na voltmetru ostane unutar normalnih granica, što je obično označeno zelenim područjem.
2. Provjera koncentracije elektrolita je moguća dok baterija radi. Korištenjem vakuumske pumpice, dio kiseline se usisava iz ćelije i analizira. Ako se utvrdi da je koncentracija unutar postavljenih ograničenja, to ukazuje na ispravno stanje ćelije.
3. Provjera napona kompletnog skupa baterija predstavlja manje pouzdan, ali jednostavan pristup. Potrebno je isključiti napajanje iz mreže te tada izmjeriti napon baterije koja trenutno opskrbljuje spojene potrošače. Napon treba biti najmanje 2 volti po ćeliji (u rasponu od 2 do 2,1 volti), što znači da mora biti najmanje jednak nominalnom istosmjernom naponu mreže koju napaja (na primjer, 24, 110 ili 220 volti). No, složenost leži u činjenici da kompletan skup baterija često uključuje mnogo baterija koje su spojene paralelno i serijski. Paralelno spojene baterije nije moguće pojedinačno ispitati bez njihova odvajanja.²⁰

²⁰ Cuculić A: **Brodski električni sustavi**, skripta za kolegij 2018.

3.2. RASKLOP I DISTRIBUCIJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Neophodno je siguran i učinkovit način distribuirati električnu energiju na brodu te je prenijeti od izvora (generatora) do primarnih i sekundarnih potrošača. Za ovu svrhu, koriste se razvodne ploče, transformatori i kabelski vodovi. Generalno, može se prepoznati dva glavna područja distribucije - primarna i sekundarna. Primarni distribucijski sustav sadrži uređaje koji su direktno spojeni na napon generatora (obično visokonaponski uređaji). S druge strane, u sekundarnoj distribuciji uređaji su spojeni na mrežu putem sekundara priključnog transformatora, pri čemu nema izravne fizičke veze s generatorom, već su galvanski odvojeni.



Slika 9. Primjer rasklopa brodske mreže

Izvor: Giuffrida, M.: Electrical Plants and Electric Propulsion on Ships, 2019.

3.2.1. Glavna rasklopna ploča

Glavna visokonaponska ploča predstavlja središte elektroenergetskog sustava, a sadrži sabirnice na koje su priključeni izvori (svi generatori osim generatora za nužnost) i sva visokonaponska trošila. Moderne brodske ploče funkcioniraju primarno u obliku modula koji se za različite aplikacije pomoću jednostavnog principa povezuju, što olakšava ugradnju i održavanje. Sabirnice visokonaponske rasklopne ploče obavezno moraju biti podijeljene na više sekcija (obično na dvije, ali kod većih sustava moguće je i na više). Na svaku sekciju se može spojiti samo polovičan broj ukupnog broja generatora, kao i polovičan broj najbitnijih trošila. Razlog tomu je mogući slučaj direktnog kratkog spoja na sabirnicama, a pritom da dobava električne energije bude dostupna nakon što se sekcija sabirnica na kojima je došlo do kvara isključi iz sistema. Između ostalog, upravo ova topologija glavne visokonaponske rasklopne ploče omogućava da određena trošila, za koja klasifikacijska društva to eksplicitno nalažu, imaju mogućnost dvostranog napajanja iz različitih sekcija.²¹

Glavna visokonaponska ploča ima sljedeće specifične zahtjeve i značajke:

- rad u posebnim okolišnim uvjetima (u smislu sobne temperature, vlage, nagiba, vibracija, elektromagnetske kompatibilnosti)
- rad u mreži s visokim stupnjem smetnji u smislu viših harmonika
- ograničen radni prostor
- (uglavnom) kombinirana konfiguracija prekidača i sklopnika²²

Pa tako u cilju smanjenja dimenzija glavne rasklopne ploče i priključnih kablova, te povećanja selektivnosti sustava rabe se ostale rasklopne ploče koje se priključuju na glavnu ploču. To mogu biti: rasklopna ploča za pojedinačne uputnike motora, ploča za napajanje u nuždi, razdjelnici snage i rasvjete.

Veličina sabirnica odabire se pažljivo kako bi se osiguralo da su u mogućnosti podnijeti ekstremna električna opterećenja koja nastaju tijekom kratkog spoja. Otpornost materijala i kvaliteta izvedbe igraju ključnu ulogu u osiguranju da sabirnice ne dođu do kritičnog trenutka oštećenja.

²¹ Cuculić, A.: **Procedure iskapčanja visokog napona na brodu**, Rijeka, 2020.

²² Giuffrida, M.: **Electrical Plants and Electric Propulsion on Ships**, Švicarska, 2019.



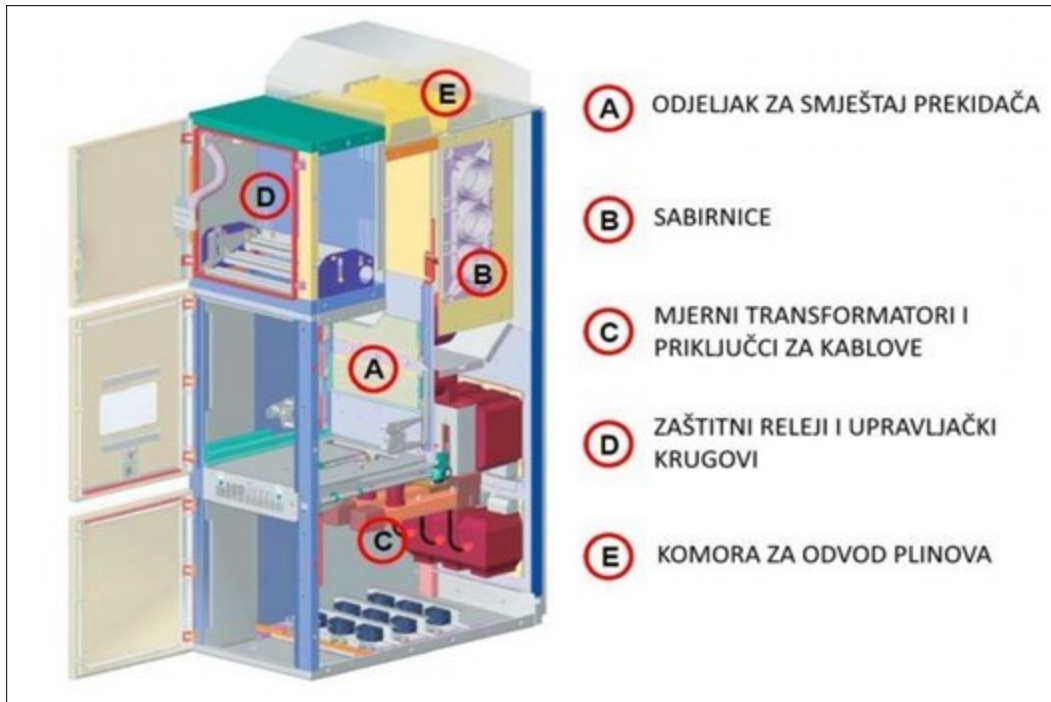
Slika 10. Sabirnice visokonaponske ploče

Izvor: Cuculić, A.: Brodski električni sustavi, skripta za kolegij, 2018.

Prilikom projektiranja sabirnica, bitno je obratiti pažnju na njihovu rezonantnu frekvenciju. Rezonantna frekvencija sabirnice predstavlja frekvenciju pri kojoj sabirnica počinje oscilirati i povećava se rizik od nepoželjnih pojava poput pregrijavanja ili oštećenja. Važno je osigurati da rezonantna frekvencija sabirnice ne bude blizu osnovnog ili drugog harmonika frekvencije struje mreže. Na primjer, ako je frekvencija mreže 60 Hz, treba izbjegavati da rezonantna frekvencija sabirnice bude unutar područja između 50 i 70 Hz, te 110 i 130 Hz. Kada rezonantna frekvencija sabirnice leži u blizini frekvencija osnovnog ili drugog harmonika struje mreže, mogućnost neželjenih rezonanci se povećava. Ovo može dovesti do nepredvidivih ponašanja sustava, pregrijavanja, prekida rada, pa čak i oštećenja opreme. Stoga je neophodno pridržavati se smjernica koje će osigurati da rezonantna frekvencija sabirnice bude izvan područja frekvencija koje bi mogle izazvati rezonancu.

Polje glavne rasklopne ploče sastoji se od pet ključnih dijelova:

- A. Dio za smještaj strujnog prekidača
- B. Sabirnica
- C. Mjerni transformatori i priključci za kabele
- D. Zaštitni releji i upravljački krugovi
- E. Komora za odvod plinova



Slika 11. Polje glavne visokonaponske ploče s pripadajućim dijelovima

Izvor: Cuculić, A.: Brodski električni sustavi, skripta za kolegij 2018.

3.2.2. Visokonaponski transformatori

Povećanje napona distribucije rezultira smanjenjem struje za istu snagu, stoga se upotrebom transformatora visoki napon reducira na znatno nižu, sigurniju i funkcionalniju razinu. Transformator je pasivni električni uređaj temeljen na Faradayevom zakonu indukcije, omogućujući pretvorbu napona iz jednog nivoa u drugi putem međudjelovanja magnetskih polja dviju namotnica. Osnovno se sastoji od primarne i sekundarne namotnice. Primarni namot prima energetske ulaz, dok sekundarni namot predaje transformiranu energiju. Primarni namot također posjeduje viši napon. Ove dvije električne namotnice su električki izolirane, ali su međusobno povezane magnetski putem zajedničke jezgre koja prenosi energiju putem magnetskog polja. Na sekundarnoj namotnici se inducira napon proporcionalan omjeru namota između primarne i sekundarne strane. Transformator također djeluje kao galvanski izolator, osiguravajući da dvije razine električnog sustava nisu fizički povezane.

3.2.3. Pretvarači frekvencije

Glavna uloga pretvarača frekvencije unutar električnog sustava propulzije je omogućiti širok opseg regulacije smjera rotacije i broja okretaja propelera. Također, čest je zadatak pretvarača frekvencije reducirati frekvenciju iz izvora kako bi se uskladila s predviđenim nominalnim brojem okretaja za propulzijski motor, odnosno brodski vijak. Kao i s ostalom brodskom opremom, pretvarači frekvencije moraju biti prilagođeni operativnim uvjetima na brodu te moraju se pridržavati relevantnih propisa i pravila brodogradnje. Električni sustavi za propulziju postavljaju određene zahtjeve pred pretvarače frekvencije, a to su da imaju:

- visoki stupanj korisnosti
- visok faktor snage
- visoka pouzdanost
- nisko izobličenje ulazne struje
- nizak udio harmonika na izlazu
- mala masa i volumen
- niska cijena²³

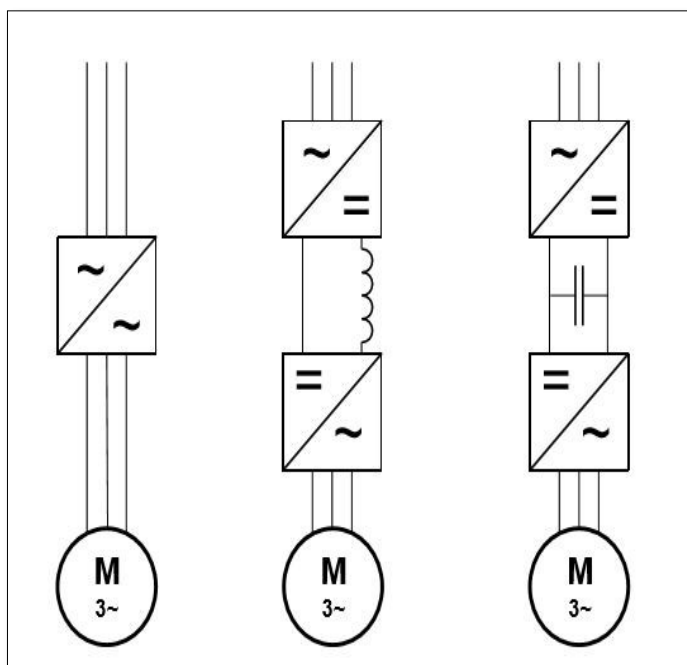
Kada primijenimo pretvarače frekvencije za napajanje sinkronih i asinkronih strojeva, postizemo značajno poboljšane upravljačke karakteristike. Pomoću promjene frekvencije napajanja, motori su sposobni postepeno startati s konstantnom nominalnom strujom i precizno reguliranom brzinom.

Stoga, pretvarače frekvencije se dijele u dvije kategorije: direktne, koje ne posjeduju značajna pohranjena energijska skladišta poput kondenzatora ili induktiviteta. Oni neposredno konvertiraju izmjenični napon i struju dobivene iz izvora u izlazni izmjenični napon i struju. S druge strane, indirektni pretvarači prvo pretvaraju ulaznu izmjeničnu električnu energiju korištenjem ispravljača, nakon čega je stabiliziraju pomoću vlastitih pohranjenih energijskih skladišta u istosmjernom međukrugu (stoga su poznati i kao pretvarači frekvencije s istosmjernim međukrugom). Naposljetku, koristeći izmjenjivače, tu energiju ponovno pretvaraju u izmjenični napon i struju, ali različite frekvencije i amplitude.

Ovisno o načinu stabilizacije u istosmjernom međukrugu, nazivaju se indirektni pretvarači frekvencije s utisnutom strujom ako koriste veliku prigušnicu za stabilizaciju struje, ili indirektni

²³ Cuculić, A. : **Električni poriv broda**, skripta za kolegij, 2019.

pretvarači frekvencije s utisnutim naponom ako koriste veliki kondenzator za stabilizaciju napona. Primjeri indirektnih pretvarača frekvencije s utisnutom strujom uključuju sinkrokonverter, dok su primjeri indirektnih pretvarača frekvencije s utisnutim naponom širinsko-impulsno modulirani (ŠIM) pretvarači frekvencije. S druge strane, direktni pretvarač frekvencije naziva se ciklokonverter.



Slika 12. Pojednostavljeni prikaz direktnih i indirektnih pretvarača frekvencije

Izvor: Cuculić, A. : Električni poriv broda, skripta za kolegij, 2019.

3.2.4. Visokonaponski strujni prekidači

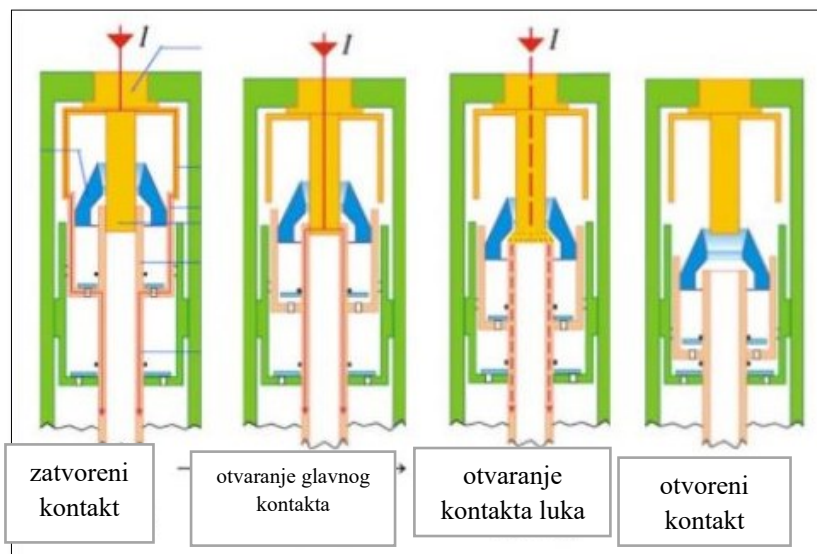
Prekidač treba biti opremljen mogućnošću otkrivanja kvarova putem zaštitnih releja kako bi mogao na vrijeme isključiti dio sustava koji se preko njega napaja kada se kvar pojavi. Tijekom tog isključivanja, prilikom razdvajanja kontakata, može nastati električni luk. Kada dođe do kratkog spoja, struja koja prolazi kroz kontakte može biti znatno veća od standardne, a luk koji se stvori između otvorenih kontakata omogućava da struja i dalje teče. Kako bi se izbjeglo pregrijavanje kontakata, ovaj luk se treba kontrolirano suzbiti (ograničiti, ohladiti i ugasiti). Za to se koriste posebne komore za gašenje luka (Arc chamber). Razmak između kontakata mora biti

dovoljno velik kako bi izdržao kratkotrajni nagli porast napona koji se javi kada se struja prekine što bi moglo uzrokovati ponovno stvaranje električnog luka. Stoga se unutar tih kontakata koriste materijali s izvrsnim električnim i hlađenim svojstvima. U visokonaponskim situacijama, to su vakuum i SF₆ plin.

SF₆ model prekidača, čije je kućište hermetički zatvoreno, ispunjen je SF₆ plinom. Drugim riječima, sumporov heksafluorid ima sve potrebne karakteristike da bi omogućio sprječavanje električnog luka unutar prekidačkog kućišta:

- zapaljiv je
- ima visoke izolacijske karakteristike
- učinkovito uklanja toplinu što rezultira gašenjem luka²⁴

Važno je spomenuti da SF₆ plin nije u skladu s „Kyoto sporazumom“ pa se stoga njegovo ispuštanje u atmosferu mora izbjegavati.



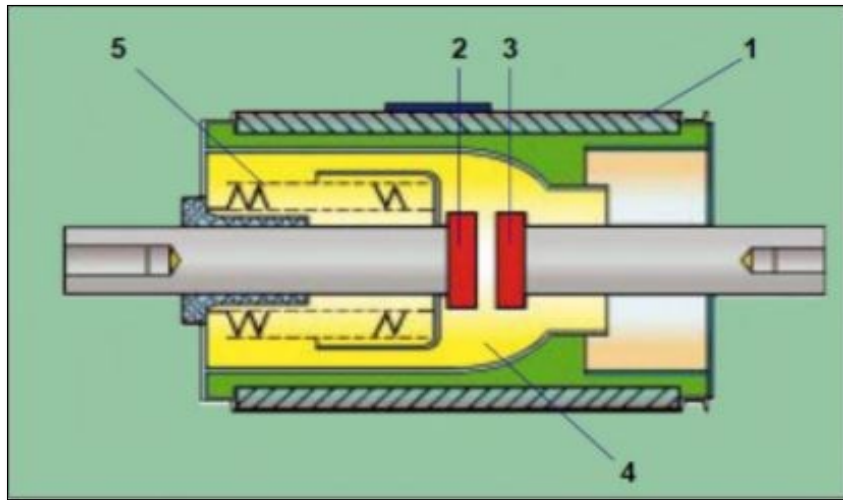
Slika 13. Sekvenca otvaranja kontakata HD4 prekidača

Izvor: ABB priručnik

Druga vrsta visokonaponskih prekidača sadrži unutrašnjost kućišta pod visokim vakuumom. Prekidač nije opremljen dijagnostičkim sustavom kvara, premda su nepropusnost i čvrstoća zagarantirane od strane proizvođača. Uspoređujući sa SF₆ prekidačima, vakuumski nastoje

²⁴ Giuffrida, M.: **Electrical Plants and Electric Propulsion on Ships**, Švicarska, 2019.

napraviti veće prenapone prilikom otvaranja kontakata. Upravo iz ovog razloga, u posebnim uvjetima rada, uređaji za suzbijanje prenapona trebaju osigurati da ne dođe do oštećenja elektroenergetske mreže i njezinih strujnih krugova.



Slika 14. Dijelovi vakuumskog prekidača V-CONTACT

Izvor: ABB priručnik

Iz shematskog prikaza je vidljiv tlocrt vakuumskog prekidača V-CONTACT tvrtke ABB za kojeg je bitno navesti 5 ključnih elemenata:

- 1) keramičko kućište
- 2) klizni kontakti
- 3) fiksni kontakti
- 4) komora za odvod plinova
- 5) čelično podnožje



Slika 15. Vakuumski strujni prekidač VD4

Izvor: <https://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/circuit-breakers>

Prije odabira vrste i dimenzije prekidača, bitno je poznavati sljedeće varijable i faktore:

- Nazivni napon mreže U_n
- Najveća kontinuirana struja tereta (nazivna struja) I_n
- Najveća struje kratkog spoja (početna ili udarna struja kratkog spoja)
- Trajanje struje kratkog spoja
- Učestalost prekidanja
- Frekvencija napona mreže
- Uvjeti okoline
- Fizičke dimenzije²⁵

²⁵ Cuculić, A. : **Električni poriv broda**, skripta za kolegij, 2019.

3.2.5. Brodska kabelska mreža

Brodsku električnu mrežu koristimo kako bi se ostvarila veza između izvora električne energije, rasklopnih ploča i raznih uređaja na brodu. Ova mreža omogućuje prijenos električne energije, mjerenje, signalizaciju te obradu signala. Kada se govori o svrsi kabela na brodu, možemo ih podijeliti na nekoliko kategorija, a to uključuje energetske, signalne, upravljačke i komunikacijske kabele. Kabeli koji se koriste na brodu moraju udovoljavati strogim standardima kako bi osigurali pouzdanost i sigurnost u radu. Ovaj standard uključuje otpornost na različite vanjske čimbenike kao što su vlaga, ulje, mehanički udarci i temperatura.

Dimenzioniranje kabela temelji se na nazivnoj struji i maksimalnom dozvoljenom padu napona koji prema pravilima ne bi smio biti veći od 5 %. Stoga, kabeli moraju imati dovoljan presjek kako bi se izbjeglo pregrijavanje pri nazivnom opterećenju, ali i kako bi se smanjio pad napona većim udaljenostima. Brodski energetske kablovi obično imaju dodatni zaštitni oklop u obliku metalne mreže. Ovaj oplet povećava čvrstoću kabela i štiti ga od raznih vanjskih faktora. Nadalje, oplet sprečava elektromagnetsko zračenje kod energetskih kabela i induciranje napona kod signalnih, upravljačkih i komunikacijskih kabela. Pravilno polaganje kabela ima ključnu ulogu u osiguranju funkcionalnosti električne mreže. Kabeli se često postavljaju u posebno dizajnirane kabelske trase od perforiranog lima radi sprječavanja zadržavanja vode i olakšavanja učvršćivanja. Prilikom polaganja, treba voditi računa o duljini kabela, fleksibilnosti za lakše provlačenje, izbjegavanju oštećenja, kao i postavljanju kabela dalje od izvora topline i vlažnih područja. Signalni kabeli se nikada ne polažu uz energetske, a opet je važno osigurati i kvalitetno brtvljenje i pravilan prolaz kroz pregrade i palube. Sustavno održavanje, praćenje i postavljanje kabela su ključni za osiguravanje pouzdane i sigurne električne mreže na brodu.



Slika 16. Visokonaponska kabelska mreža

Izvor: <https://www.infrastructuremalta.com/news/laying-high-voltage-cables-shore-ship-electricity-grand-harbour>

Posebno se mora obratiti pažnja na visokonaponske brodske kabele. Iako imaju manji presjek bakra zbog smanjenih vrijednosti struje, ovi kabele zahtijevaju pojačanu izolaciju kako bi se spriječilo probijanje koje može uzrokovati visoki napon. Visokonaponski kabele se obično označavaju jasnom crvenom bojom radi lakše identifikacije i sigurnosti. Jedna važna smjernica prilikom polaganja kabela je izbjegavanje kombiniranja kabela visokih i niskih napona u istoj kabelskoj trasi. Ovo je važno kako bi se spriječila interferencija i osigurala optimalna izolacija. Prilikom provlačenja kabela kroz nastambe, važno je koristiti zatvorene prolaze i osigurati pravilno brtvljenje kako bi se zaštitili od vanjskih faktora i prodora vode koji bi mogli oštetiti kabele.



Slika 17. Visokonaponski energetska kabl s tri vodiča

Izvor: Cuculić, A. : Električni poriv broda, skripta za kolegij, 2019.

1. vodič,
2. oklop vodiča,
3. izolacija
4. oklop izolacije
5. metalni oklop
6. vodič za uzemljenje
7. oklop
8. plašt
9. zaštitni metalni oklop
10. odvojna traka
11. vanjski plašt

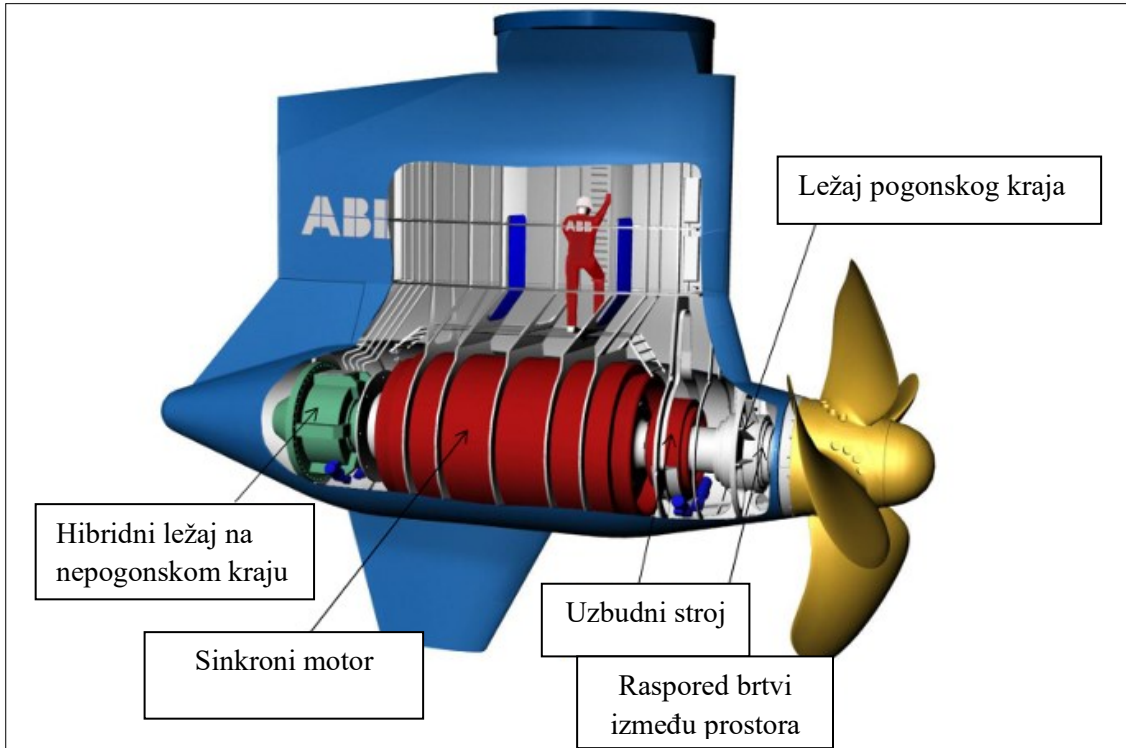
3.3. SUSTAV ELEKTRIČNE PROPULZIJE

Azipod sustav je kombinacija pogona i upravljanja brodova koji zamjenjuje tradicionalne propelere, dugotrajne osovine, stražnje cijevi i kormila koja su se prije koristila na brodovima za oceanske plovidbe i putničkim kruzerima. On predstavlja sustav propulzije u zatvorenom kućištu koji omogućuje azimutalno okretanje od 360 stupnjeva. Osovina se može rotirati u bilo koji položaj unutar 360 stupnjeva. Kutna pozicija rotacije može promijeniti smjer kretanja broda ili ga održavati u ravnoj liniji. Stoga se putnički brodovi s Azipod sustavima upravljaju bez kormila, slično kao što mali čamci koriste vanbrodski motor za pogon i upravljanje (ali s propelerima smještenim sprijeda, Azipodi "vuče" svoje brodove). Položaj Azipoda i brzina njihovih motora određuju časnici palube na mostu.

Električnu snagu kontrolira brodski pretvarač frekvencije i prenosi na električni motor putem energetskih kliznih prstena na modulu za prijenos snage i upravljanje. Kompaktni Azipod uključuje trajni magnetski sinkroni motor s fiksnim propelerom koji je montiran izravno na osovinu motora. Tehnologija permanentnih magneta ima mnoge prednosti u odnosu na konvencionalnu. Vanjski promjer jedinice može se smanjiti, što poboljšava hidrodinamičku učinkovitost. Jedinstveni dizajn okvira omogućuje motoru izravno hlađenje konvekcijom morske vode oko sebe, čime se eliminira potreba za sustavom hlađenja (i problemima koji uz to dolaze). Azipodi su postavljeni ispod razine vode na stražnjem dijelu broda te su montirani na osovinu koja je okomita na središnju liniju trupa broda, a to donosi i razne prednosti poput:

- fleksibilnosti rasporeda
- raznovrsnosti opterećenja između usluga broda i propulzije
- ekonomičnosti vođenja pri djelomičnim opterećenjima
- jednostavne kontrole upravljanja
- niske razine buke i vibracija²⁶

²⁶ Dewan, H.: **Safeties & applications of High voltage in Ships Mohd**, Bangladesh, 2014.



Slika 18. Unutrašnjost potrupnog potisnika

Izvor: ABB priručnik



Slika 19. Vanjski izgled jedinice Azipod-a

Izvor: <https://new.abb.com/news/detail/77454/azipodr-propulsion-supplying-sustainable-power-performance-and-comfort-to-cruise-ships>

4. STUDIJA SLUČAJA – NORWEGIAN GEM

Norwegian Cruise Line Corporation (NCL) postavila je novu narudžbu sredinom 2005. godine za brod Norwegian Gem kod brodogradilišta Meyer Werft u Njemačkoj, s isporukom u listopadu 2007. Norwegian Gem jedan je od 19 putničkih brodova u floti Norwegian Cruise Line, a pripada Jewel Class seriji proizvodnje.



Slika 20. Putnički brod Norwegian Gem

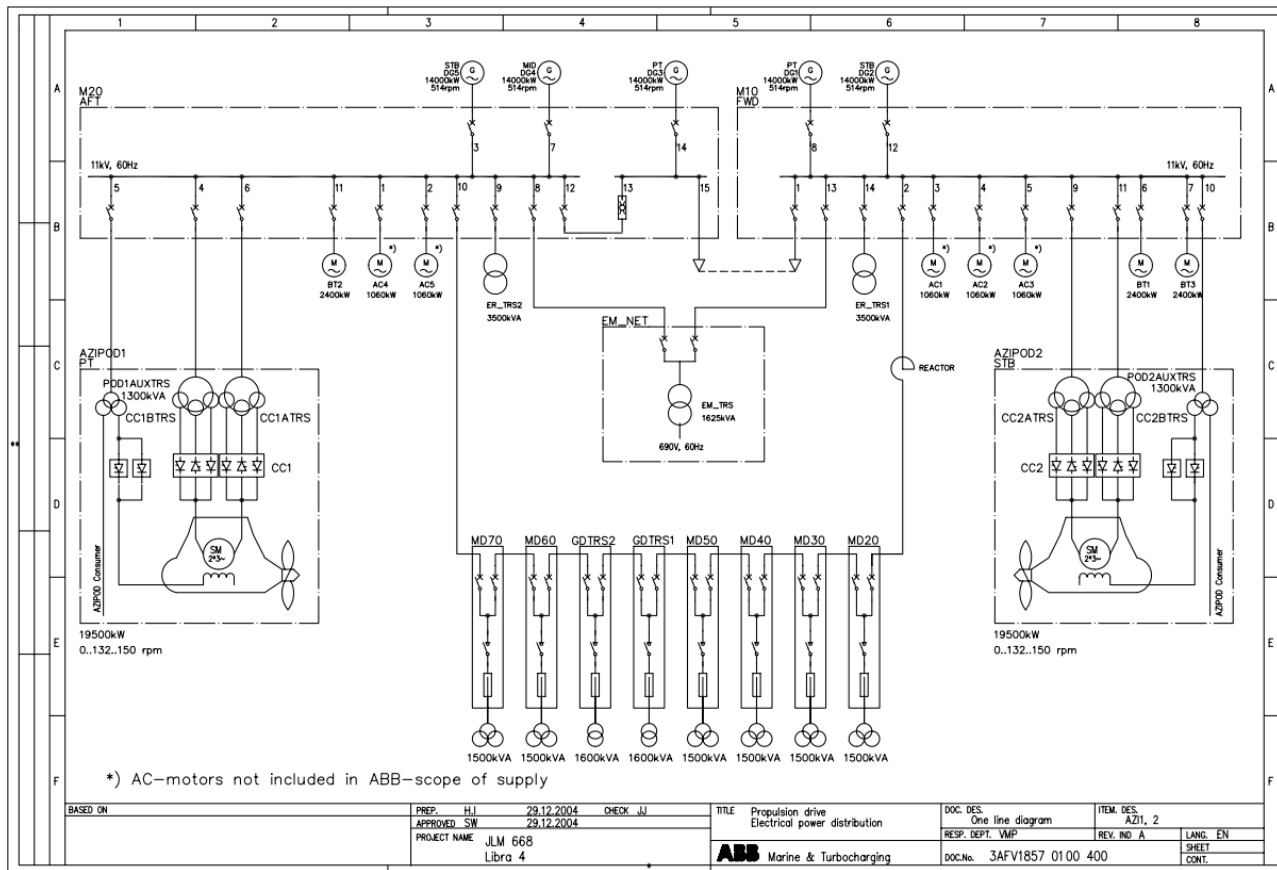
Izvor: <https://gangwaze.com/cruise-lines/norwegian-cruise-line/norwegian-gem>

U nastavku su predstavljene osnovne specifikacije broda:

- Tonaža: 93,530 BRT
- Duljina preko svega: 294 m
- Konstrukcijska širina broda (izlivena): 32.2 m
- Broj paluba: 15
- Ukupna snaga motora: 72,000 kW
- Pogonska snaga: 42 MW
- Maksimalna brzina: 23 čvora
- Kapacitet primitika putnika: 2394
- Broj članova posade: 1070
- Broj putničkih kabina: 1,197
- Serija proizvodnje: Jewel Class

4.1. PREGLED KONFIGURACIJE STROJARNICE

Razmatrani pogon putničkog broda predložen je shemom (1). Za razliku od konvencionalnih trgovačkih brodova koji imaju manje zahtjeve potrošnje i rad električne opreme i potrošača na niskonaponskim nivoima, ovdje za potrebe stvaranja električne energije, kao glavni izvor postoje čak pet dizel-generatora koji svaki posjeduje snagu od 1,4 MW. Svaku stranu visokonaponske ploče od 11 kV napajaju dva odnosno tri generatora, a frekvencija mreže iznosi 60 Hz. Sabirnice glavne rasklopne ploče međusobno su povezane putem sabirničke rastavne sklopke koja posjeduje prekostrujnu zaštitu. Ovo omogućava automatsko isključivanje oštećenog dijela sustava. U normalnim uvjetima, sabirnička rastavna sklopka je zatvorena, što rezultira time da sustav djeluje kao cjelina. Tako se osigurava ravnomjerna raspodjela snage i redundancija u slučaju da jedan razvodni ormar doživi kvar ili prekid. Rastavna sklopka može biti ručno i automatski upravljiva, ovisno o dizajnu i zahtjevima električnog sustava broda u trenutku.



Shema 1. Organizacija strojarnice Norwegian Gem-a

Izvor: ABB priručnik

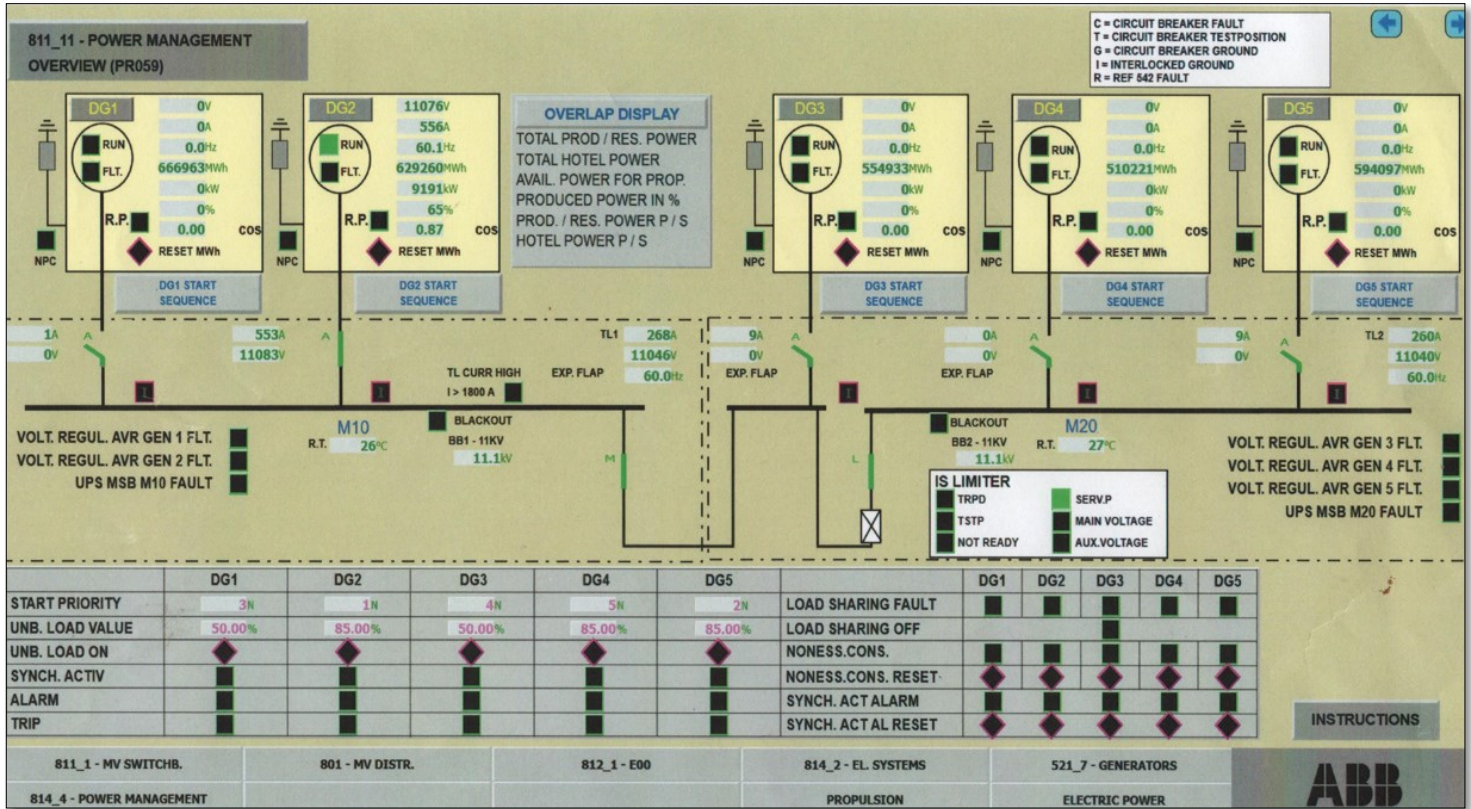
Veliki potrošači za potrebe vještog manevriranja odnosno motori pramčanih porivnika pogonjeni su pomoću 11kV trofazna izmjenična asinkrona motora. Motori koji opslužuju sve potisnike imaju nazivnu snagu od 2.400 kW, dok ostalih pet asinkronih motora koji pogone klima kompresore rade pri nazivnoj snazi od 1.080 kW.

U slučaju kada nestane napona na glavnoj razvodnoj ploči, ili se desi “*Black-out*” scenarij, u nagrađu broda na 13. palubi se nalazi generator za nuždu postavljen na automatsko upravljanje napajan preko transformatora za nuždu prividne snage od 1625 kVA. On je zadužen spustiti napon s 11 kV na 690 V kako bi niskonaponska mreža u svakom trenutku bila spremna osigurati napajanje esencijalnih trošila poput kormilarskog uređaja i rasvjete.

Dva pretvarača frekvencije, točnije ciklo-konvertera koji nemaju prigušnicu ni kondenzator kao spremište energije grade izlazni napon iz segmenata ulaznog napona, reguliraju i upravljaju brzinom vrtnje propulzijskih motora.

Električni pogon je ostvaren uz pomoć dva trofazna izmjenična sinkrona propulzijska elektromotora, napajani optimalnim naponom putem propulzijskih transformatora snage 1300 kVA.

Za elektro-časnike i časnike stroja ustav upravljanja električnom energijom, poznat kao PMS (Power Management System), predstavlja integralni skup funkcija čija je ključna svrha osigurati visoku kvalitetu napajanja te nesmetano obavljanje predviđenih operativnih zadataka na putničkom brodu, uz poštivanje svih unaprijed definiranih radnih uvjeta. Karakteristike PMS sustava ovise o nizu fiksnih parametara, uključujući broj dostupnih generatora, konfiguraciju električne mreže te ukupnu instaliranu snagu. Ovi parametri izravno utječu na količinu električne energije koja ostaje dostupna nakon pojedinačnih kvarova. U skladu s opterećenjem brodske mreže, PMS sustav automatski upravlja uključivanjem i isključivanjem dizelskih generatora, s ciljem sprječavanja prekida električne opskrbe. Istovremeno nastoji održavati optimalno opterećenje i broj aktivnih generatora u mreži. U slučaju prekida električnog sustava, PMS ima zadaću što brže automatski obnoviti napajanje i osigurati dovoljno električne energije za pokretanje svih brodskih sustava.



Shema 2. Sustav upravljanja i raspodjele energije - PMS

Izvor: Norwegian Gem Engine Control Room (18.07.2023.)

Glavne funkcije PMS sustava mogu se podijeliti u tri osnovne grupe, a prva se odnosi na upravljanje proizvodnjom električne energije koja obuhvaća automatsko pokretanje i zaustavljanje dizelskih generatora prema trenutnom opterećenju. Također, uključuje automatsku sinkronizaciju generatora u slučaju prekida ili kvara, ravnotežu opterećenja u paralelnom radu, kontrolu napona i frekvencije, te koordinaciju upravljačkih krugova i zaštitnih funkcija dizelskih generatora. Druga funkcija upravlja potrošnjom električne energije te obuhvaća nadzor i koordinaciju primijenjenih metoda za smanjenje potrošnje energije. Ovo uključuje isključivanje i privremenu blokadu manje bitnih potrošača na temelju izmjerenih rezervi snage. Treća funkcija se odnosi na upravljanje raspodjelom energije osiguravanjem da se energija prenosi tamo gdje je najpotrebnija.

4.2. ODRŽAVANJE GENERATORA

Važno je znati da tijekom manevra često se koristi više generatora nego što je trenutavno potrebno. To je kako bi se osigurala visoka razina sigurnosti u napajanju električnom energijom tijekom kritičnih trenutaka. Konkretno, za pogon asinkornih motora bočnih propelera, koji zahtijevaju znatno više snage od čak 2.400 kW, potrebno je priključiti više generatora kako bi se osiguralo optimalno napajanje.



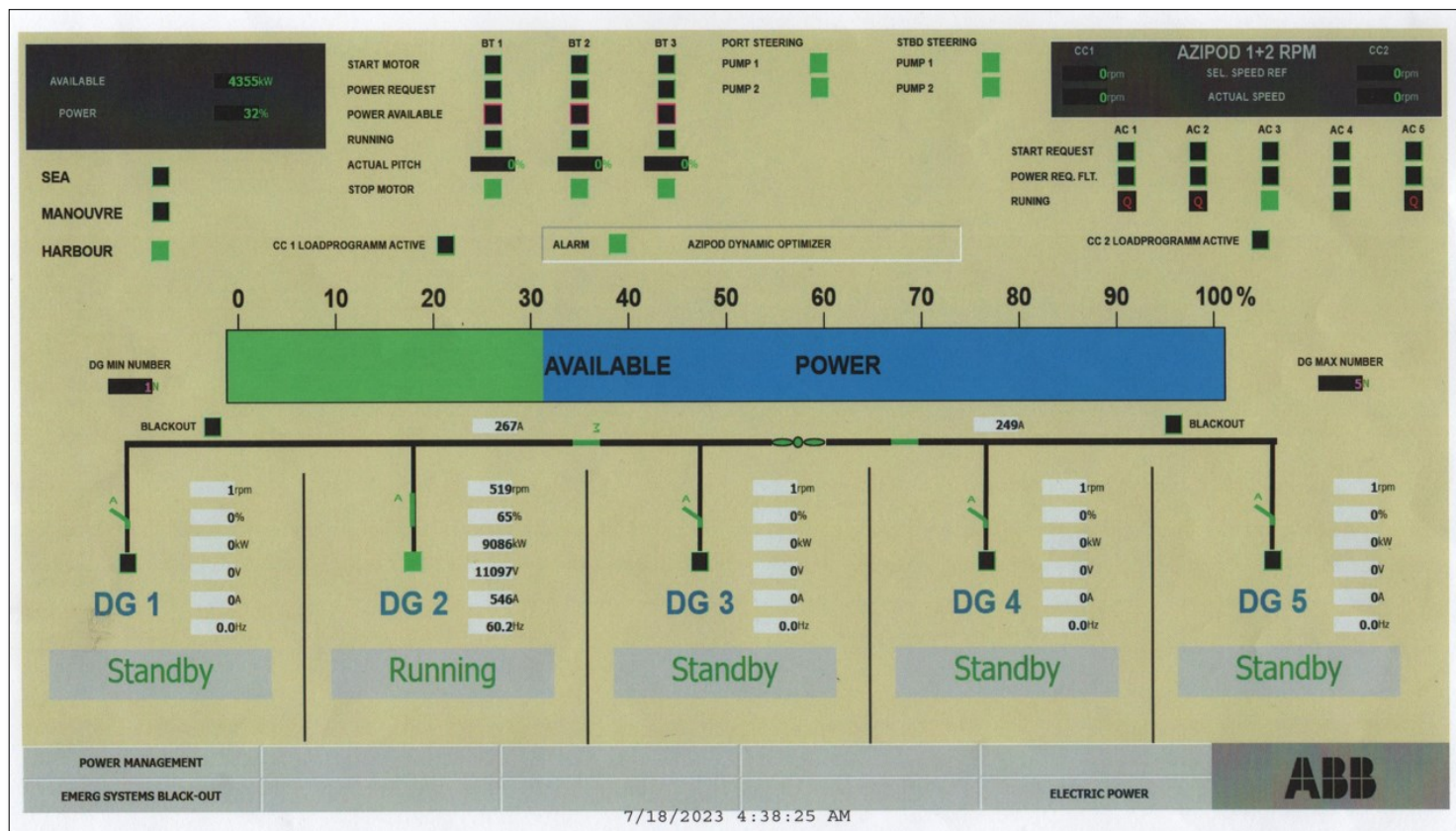
Slika 21. Sinkroni generator AMG 1600

Izvor: Norwegian Gem strojarnica (18.07.2023.)

4.2.1. Paralelni rad generatora

U skladu s regulativama, svaki brod mora osigurati dovoljan broj generatora kako bi, u slučaju ispadanja bilo kojeg od njih, preostala snaga od ispravnih generatora bila dostatna za sigurnu plovidbu. Koncept paralelnog rada generatora primjenjuje se s ciljem prilagodbe proizvodnje električne energije potrebama brodskih sustava tijekom različitih faza eksploatacije.

Shema (2) prikazuje jednopolni dijagram brodske električne mreže odnosno zaslon kontrolnog panela iz kontrolne sobe strojarnice gdje je primjetno da svi dizel-generatori koji nisu u aktivnom pogonu su postavljeni u režim rada „*Stand By*“ kako bi s obzirom na povećane zahtjeve prilikom manovre ili postizanja veće brzine na otvorenom moru mogli sinkronizirati na mrežu i uključiti u rad. Povećanjem broja generatora iznad minimalne potrebne razine, osigurava se stabilnost elektroenergetskog sustava. Ovo omogućuje kontinuiranu proizvodnju dovoljne energije čak i u slučaju iznenadnih ispada iz pogona jednog od generatora. Međutim, prevelik broj generatora u odnosu na trenutačnu potrošnju nije preporučljiv u svim fazama eksploatacije. To može rezultirati podopterećenjem pogonskih strojeva (dizel motora), što povećava potrošnju goriva i smanjuje učinkovitost sagorijevanja. Uzimajući u obzir sve aspekte, optimalan pristup leži u korištenju paralelnog rada generatora. Ovaj pristup osigurava da pogonski strojevi rade u području optimalnog opterećenja, postižući bolje iskorištenje goriva i smanjujući troškove održavanja. S druge strane, paralelni rad donosi i svoje izazove, a odnose se na sinkronizaciju, raspodjelu djelatne i jalove snage te zaštitu od povratne snage.



Shema 3. Preostala dostupna energija prije uključivanja novog generatora na mrežu

Izvor: Norwegian Gem Engine Control Room (18.07.2023.)

Postavljanje prioriteta uključivanja generatora pridonosi stabilnosti i učinkovitosti elektroenergetskog sustava broda. Sukladno važnosti prioriteta, može se primjetiti sljedeće:

- dizel generator 2 postavljen je a broj 1 kao prioritet
- dizel generator 5 postavljen je a broj 2 kao prioritet
- dizel generator 1 postavljen je a broj 3 kao prioritet
- dizel generator 3 postavljen je a broj 4 kao prioritet
- dizel generator 4 postavljen je a broj 5 kao prioritet

Za primjer u slučaju „Black out“ scenarija pri kojem su dizel-generatori 1 i 2 priključeni na prednju visokonaponsku ploču, a imaju zajednički vod dobave goriva za pokretanje dizel motora, generator za nuždu koji ima brzi odziv mora preuzeti opterećenje za nužne potrošače u roku od 10-15 sekundi kako bi se u mogao uključiti sljedeći generator. U isto vrijeme dizel-generator 5 koji je postavljen kao 2. prioritet automatski starta, sinkronizira se na mrežu, preuzima opterećenje,

a generator za nuždu se iskapča pomoću strujnog i naponskog prekidača nakon normaliziranja stanja. Ovakva realizacija i odluka donešena od strane glavnog časnika stroja, s funkcijskog gledišta, rezultira velikoj redundantnosti sustava. Također, ograničenje snage odnosno limit zahtjeva potrošača prije uključivanja sljedećeg generatora je postavljeno na 95%.

4.2.2. Postupak sinkronizacije

Sinkronizacija je ključni postupak kada se sinkroni generator želi uključiti u paralelni rad s brodskom mrežom. Ovaj proces zahtijeva preciznost i pažnju kako bi se osigurala stabilna i sigurna integracija generatora u postojeći sustav. Osnovni korak u postizanju sinkronizacije je uključivanje generatorskog prekidača kada su ispunjeni svi potrebni uvjeti. Međutim, vrijeme sinkronizacije može se produljiti zbog raznih čimbenika, poput isključivanja ili uključivanja većih potrošača tijekom tog procesa.

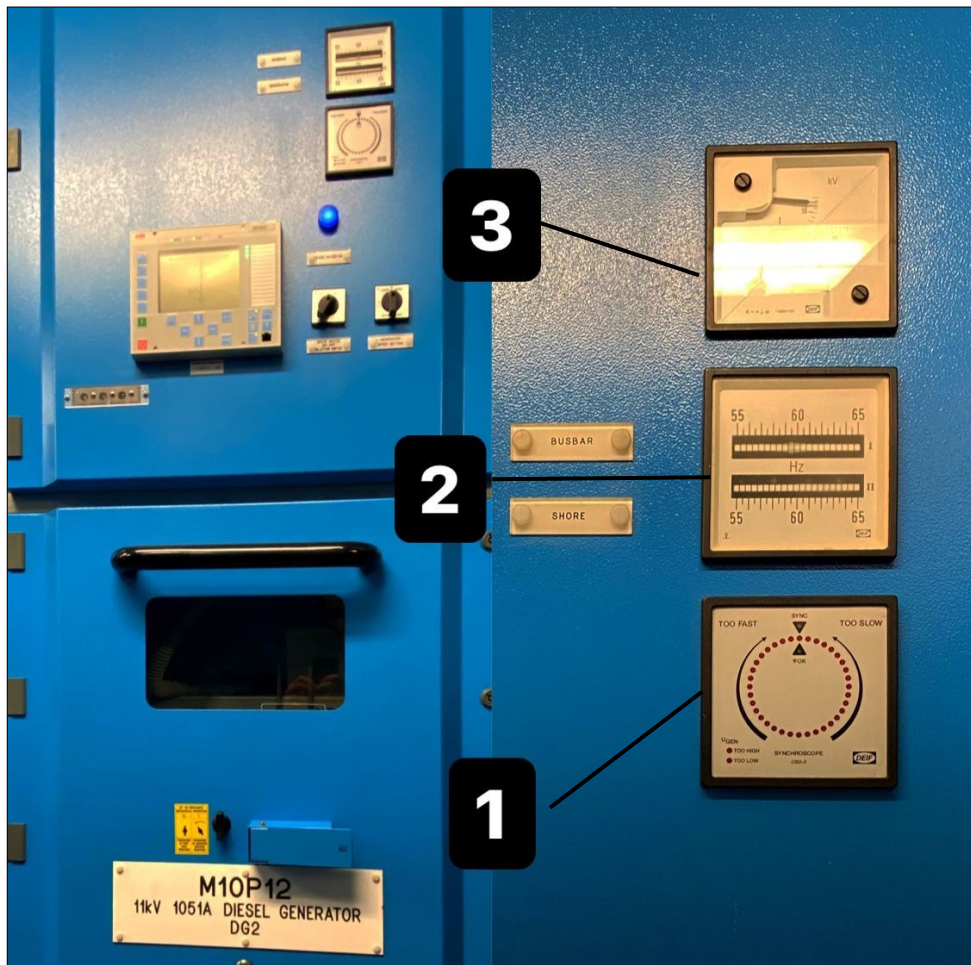
Prije nego što se generator sinkronizira s brodskom mrežom, moraju se zadovoljiti određeni uvjeti kako bi se osigurala uspješna i sigurna integracija. Ovi uvjeti uključuju sljedeće:

- **Isti redoslijed faza:** faze generatora i faze brodske mreže moraju biti poredane u istom redoslijedu kako bi se postigla ispravna sinkronizacija.
- **Jednak iznos napona:** napon generatora mora biti jednak naponu brodske mreže kako bi se postigla ravnoteža u sustavu.
- **Skoro ujednačene frekvencije:** frekvencija napona generatora treba biti približno jednaka frekvenciji brodske mreže. Generator koji se sinkronizira trebao bi se okretati malo brže kako bi se izbjeglo povlačenje snage iz mreže nakon uključivanja.
- **Istofaznost:** faze generatora i brodske mreže moraju biti istofazne kako bi se spriječila pojava struje izjednačenja.

Ove uvjete postizanje tijekom projektiranja i izgradnje broda, uključujući pravilno usklađivanje faza generatora i brodske mreže te postizanje jednakih napona i frekvencija. Proces podešavanja inducirano napona generatora ostvaruje se putem regulacije struje uzbude, dok se frekvencija i istofaznost postižu regulacijom brzine pogonskog stroja.

Važno je naglasiti da nesrazmjer u vrijednostima napona, frekvencija ili faza između generatora i mreže može uzrokovati ozbiljne posljedice. To može uključivati struju greške koja prolazi kroz generator, uzimanje snage iz mreže ili čak oštećenje generatora. Stoga je preciznost i

pažljivo izvođenje postupka sinkronizacije ključno za održavanje stabilnosti i pouzdanosti elektroenergetskog sustava broda.



Slika 22. Prikaz jedinice za sinkronizaciju

Izvor: Norwegian Gem High Voltage Switchboard Room (18.07.2023.)

Uloga sinkronoskopa (1) leži u identifikaciji trenutka kada naponi generatora i mreže postižu faznu usklađenost, što implicira odsutnost faznog pomaka između njih. Ova kritična točka označava trenutak kada je sigurno izvesti sinkronizaciju, osiguravajući da će generator biti povezan u paralelnom radu s mrežom na stabilan i koherentan način. Služi za određivanje optimalnog trenutka za uključivanje generatorskog prekidača, što je od iznimne važnosti za ravnotežu i stabilnost elektroenergetskog sustava.

Preciznost sinkronizacije postiže se primjenom dvostrukog frekvencometra (2) i dvostrukog voltmetra (3). Ovi uređaji pridonose točnom mjerenju napona i frekvencije generatora i mreže,

čime se osigurava njihova uzajamna usklađenost. Sinkronoskop, zajedno s navedenim mjernim uređajima, pruža tehničarima i operaterima pouzdane informacije o faznoj podudarnosti, što je ključno za uspješnu sinkronizaciju.

Nakon što se novi generator uspješno povezo u paralelni rad s brodskom mrežom koju je prethodno napajao prvi generator, novi generator još uvijek radi s minimalnim opterećenjem. Kako bi preuzeo dio opterećenja s prvog generatora, koji je sada elastično povezan s njim putem tzv. električne osovine (oba stroja rotiraju istom brzinom zbog paralelnog spoja i iste napona i frekvencije), potrebno je povećati snagu na drugom generatoru i smanjiti dovod goriva na prvom generatoru. Ovim pristupom, pri održavanju konstantne brzine vrtnje, odnosno frekvencije, postiže se prenos dijela snage s prvog generatora na drugi. Bitno je napomenuti da se ova preraspodjela snage ne izvodi izravnim fizičkim pomicanjem ručice za gorivo, već se postiže preko regulatora broja okretaja.

Također, upravljanje se može provoditi i iz kontrolne sobe brodske strojarnice. Svaki generator ima svoju vlastitu upravljačku ploču koja omogućuje ručno upravljanje uzbudom i frekvencijom tog generatora. Osim toga, iste funkcije mogu se izvoditi i putem sinkronizacijskog panela putem tipki označenih kao "Excitation" i "Governor". Korištenjem tipki "Excitation" može se kontrolirati napon, dok se tipkama "Governor" regulira brzina vrtnje generatora, što utječe na frekvenciju izlaznog napona tog generatora na stezaljkama.

4.2.3. Zaštite generatora

Električki zaštitni uređaji služe za zaštitu generatora od potencijalnih unutarnjih i vanjskih poremećaja. Ovi uređaji se klasificiraju prema metodama mjerenja primarnih i sekundarnih veličina, prema tipu konstrukcije kao elektromehanički ili elektronički, te prema vremenskom odzivu kao zavisni ili nezavisni uređaji. Preporučene zaštite sinkronih generatora:

Zaštita od kratkog spoja ima funkciju isključivanja generatorskog prekidača kada se dogodi bliski kratki spoj kako bi se sačuvalo generator i sustav od potencijalnih oštećenja. Iako trenutačno isključivanje bilo najbolje za generator, zaštita od kratkog spoja ima postavljeno odgođeno isključivanje (vremensko zatezanje) kako bi se osigurala selektivnost.

Podnaponska zaštita služi kao rezervna mjera zaštite od kratkog spoja i isključuje sustav kada napon padne na 85% nominalnog napona ($0,85U_n$). Također ima postavljeno vremensko

zatezanje kako bi se uzelo u obzir pokretanje velikih motora, sinkronizacija i selektivnost isključivanja kratkog spoja.

Zaštita od preopterećenja se aktivira kada je generator preopterećen, isključujući manje važne potrošače kako bi se spriječilo preopterećenje. To se postiže postavljanjem kraćeg vremenskog zatezanja kako bi se omogućilo brže isključivanje.

Prekostrujna zaštita ima ulogu isključivanja generatorskog prekidača kada struja generatora premaši 1,2 nazivne struje (I_n) kako bi se spriječila oštećenja. Iako trenutno isključivanje bilo najbolje za generator, prekostrujna zaštita ima vremensko zatezanje kako bi omogućila aktivaciju zaštite od preopterećenja, pokretanje i sinkronizaciju generatora u pričuvi te kako bi se osiguralo da generator ne isključi zbog kratkotrajnog velikog opterećenja koje veliki asinkroni motori mogu izazvati prilikom pokretanja.

Zaštita od povratne snage ima zadaću isključivanja generatorskog prekidača kada generator prelazi u motorski način rada i počinje uzimati energiju iz mreže, opterećujući preostale generatore. Ovo se može dogoditi zbog kvara u pogonskom sustavu ili pogrešnog upravljanja. Postavlja se na 10-15% nominalne snage (P_n) za dizel motore i ima vremensko zatezanje kako bi se uzelo u obzir sinkronizaciju i fluktuacije opterećenja.

Termička zaštita generatora koristi termosonde smještene u njegovim namotima kako bi otkrila preveliku temperaturu. Kada se detektira visoka temperatura, termička zaštita isključuje generatorski prekidač kako bi zaštitila generator. Ova zaštita djeluje kao rezervna mjera zaštite od prekostrujne i zaštite od preopterećenja.

Diferencijalna zaštita se koristi kod velikih generatora kako bi se zaštitili od unutarnjih kvarova, poput kratkog spoja unutar samog generatora. Mjeri razliku između ulazne i izlazne struje svake faze namota te isključuje generatorski prekidač i zaustavlja pogonski sustav ako se otkrije diferencijalna struja od $0,1 (I_n)$, što ukazuje na unutarnji kvar u generatoru.²⁷

²⁷ **Bistrović, M:** Kolegij, Ispitivanje brodskih električnih uređaja, Rijeka 2021.

Isto tako, radno osoblje zaduženo je za redovitu inspekciju sinkronog stroja. To uključuje slušanje, dodirivanje i osjet mirisa sinkronog stroja te njegove pripadajuće opreme kako bi se stekao osjećaj normalnih radnih uvjeta. To je bitno kako bi se abnormalni događaji otkrili i popravili na vrijeme. Stoga se preporučuje upotreba obrasca za nadzornu inspekciju, po mogućnosti sličnog onome u tablici (2), u kojem se ispunjava preporučeni program nadzorne inspekcije. Podaci dobiveni iz nadzorne inspekcije trebaju se zadržati za buduće reference i mogu biti od pomoći u radu održavanja, otklanjanju problema i popravcima. Granica između nadzora i održavanja zna biti često nejasna. Normalni nadzor rada uključuje bilježenje operativnih podataka kao što su opterećenje, temperature itd., a komentari se koriste kao osnova za održavanje i servisiranje.

- Tijekom prvog perioda rada (- 200 sati) nadzor treba biti intenzivan. Temperature ležajeva i namota, opterećenje, struja, hlađenje, podmazivanje i vibracija trebaju se često provjeravati.
- Tijekom narednog razdoblja rada (200 - 1000 sati) jedna provjera dnevno je dovoljna. Zapisnik nadzorne inspekcije treba se koristiti i arhivirati. Ako je rad kontinuiran i stabilan, vremenski razmak između inspekcija može se dalje produžiti.²⁸

Tablica 2. Primjer dijela test programa generatora

| Machine type: | | Serial number: | | | | | | |
|-----------------------------|----|-----------------------|--|--|--|--|--|--|
| Point of inspection: | | Date: | | | | | | |
| Sator current | kA | | | | | | | |
| Excitation current | A | | | | | | | |
| Bearing temperature, D-end | °C | | | | | | | |
| Bearing temperature, ND-end | °C | | | | | | | |

Izvor: ABB priručnik

Kako bi osigurali dug vijek trajanja konstrukcije stroja, vanjski dio generatora treba održavati čistim i redovito pregledavati radi hrđe, curenja i drugih nedostataka. Prljavština na vanjskom dijelu stroja izlaže kućište koroziji i može utjecati na hlađenje stroja.

²⁸ ABB priručnik

Temperature ležajeva se mjere pomoću Pt-100 senzora temperature otpora. Normalna temperatura ležajeva trebala bi biti između 65 i 85 °C. Budući da porast temperature iznad granice alarma može biti uzrokovan ili povećanim gubicima u ležaju ili smanjenom kapacitetom hlađenja, često ukazuje na problem negdje u stroju ili u sustavu podmazivanja, stoga bi ga trebalo pažljivo pratiti.



Slika 23. PT-100 senzor temperature otpora

Izvor: <https://www.indiamart.com/proddetail/rtd-pt100-temperature-sensor-20608078648.html>

Namotaji rotirajućih električnih strojeva izloženi su električnim, mehaničkim i termalnim opterećenjima. Namotaji i izolacija postupno stare i propadaju zbog tih opterećenja. Stoga, vijek trajanja stroja često ovisi o trajnosti izolacije. Mnogi procesi koji dovode do oštećenja mogu se spriječiti ili barem usporiti uz odgovarajuće održavanje i redovite provjere. Postoje tri glavna načela za planiranje održavanja namotaja:

- Održavanje namota treba uskladiti s održavanjem drugih dijelova stroja.
- Održavanje treba provoditi samo kad je to potrebno.
- Važni strojevi trebaju se servisirati češće od manje važnih, a to se odnosi i na namotaje koji se brzo onečišćuju i na teške pogone.

4.3. MJERENJE OTPORA IZOLACIJE

Za svu električnu opremu ključan pokazatelj njezine sigurnosti i općeg stanja je otpor izolacije, posebno za visokonaponske uređaje. Otpor izolacije mora se periodično testirati između faza i između faza i zemlje. Visokonaponska oprema koja je dobro dizajnirana, održavana i koja se koristi unutar svojih snage i temperaturnih ograničenja trebala bi imati koristan vijek trajanja izolacije od 20 godina. Kao opća smjernica, ispitivanje otpora izolacije trebalo bi se provoditi jednom godišnje. To bi trebalo biti dovoljno za većinu strojeva u većini uvjeta rada. Druga ispitivanja trebala bi se provoditi samo ako se pojave problemi.

Tijekom općeg održavanja i prije prvog pokretanja stroja ili nakon dugog razdoblja nekorištenja, potrebno je izmjeriti otpor izolacije statorskih i rotorskih namotaja. Ispitivanje otpora izolacije pruža informacije o vlažnosti i onečišćenju izolacije. Na temelju tih informacija mogu se odrediti pravilni postupci čišćenja i sušenja.

Otpor izolacije se mjerenjem određuje pomoću prijenosnog instrumenta poznatog kao megaohmmetar (Megger), koji pruža očitavanja otpora izolacije u megaomima.

Mjerenje otpora izolacije ima tri svrhe:

1. Provjerava da li je izolacija oštećena.
2. Utvrđuje stanje izolacije uređaja prije nego što se priključi na puni napon.
3. Omogućuje usporedbu s budućim ispitivanjima izolacije kako bi se pratila bilo kakva promjena u izolaciji (npr. vlaga, starenje ili eventualna oštećenja).



Slika 24. Megger instrument za mjerenje otpora izolacije

Izvor: Cuculić, A: Brodski električni sustavi, Rijeka 2018.

Standardna procedura za korištenje megaohmmetra (Megger) za testiranje otpora kabela obuhvaća sljedeće korake:

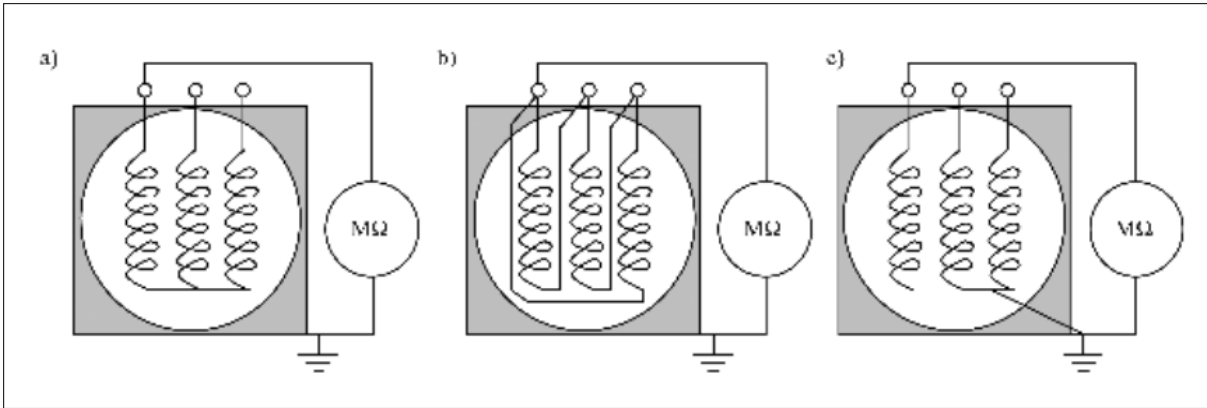
- Isključivanje kabla iz ostale opreme i strujnih krugova kako bi se osiguralo da nije pod naponom i da ga se može testirati.
- Pražnjenje svog preostalog kapaciteta u kابلu tako da se uzemlji prije i nakon testiranja.
- Povezivanje mjernih vodiča s instrumentom na kabel koji se testira.
- Povezivanje svih drugih vodiča zajedno s plaštom kabela i zemljom; spajanje ovoga na mjerni priključak za uzemljenje.
- Paralelno mjerenje ostalih vrijednosti izolacijskog otpora između svakog pojedinog vodiča i svih ostalih spojenih vodiča, zatim između svakog pojedinog vodiča i zemlje itd.
- Zaštitni terminal megaohmmetra može se koristiti za uklanjanje utjecaja površinskih gubitaka na dijelovima gdje je izolacija izložena na kraju kabela ili na oba kraja, te se također može koristiti za uklanjanje gubitaka prema zemlji.²⁹

Otpor izolacije statorskih namota mjeri se pomoću uređaja za mjerenje izolacijskog otpora. Testni napon je 5000 VDC. Vrijeme testiranja iznosi 1 minutu, nakon čega se zabilježi vrijednost otpora izolacije. Prije nego što se provede ispitivanje treba provjeriti sljedeće:

- sekundarni spojevi strujnih transformatora ne smiju biti otvoreni.
- kućište stroja i statorski namotaji koji se ne ispituju moraju biti uzemljeni.
- temperature namotaja trebaju biti izmjerene.
- svi senzori temperature otpora su uzemljeni.
- moguće uzemljenje naponskih transformatora (nije uobičajeno) mora biti uklonjeno.³⁰

²⁹ Bistrović, M: Kolegij, Ispitivanje brodskih električnih uređaja, Rijeka 2021.

³⁰ ABB priručnik



Slika 25. Varijante mjerenja otpora izolacije statorskih namotaja

Izvor: ABB priručnik, Norwegian Cruising Line, 2005.

- a) Mjerenje otpora izolacije za spoj-trokut namotaja,
- b) Mjerenje otpora izolacije za spoj-zvijezda namotaja
- c) Mjerenje otpora izolacije za jednu fazu namotaja.

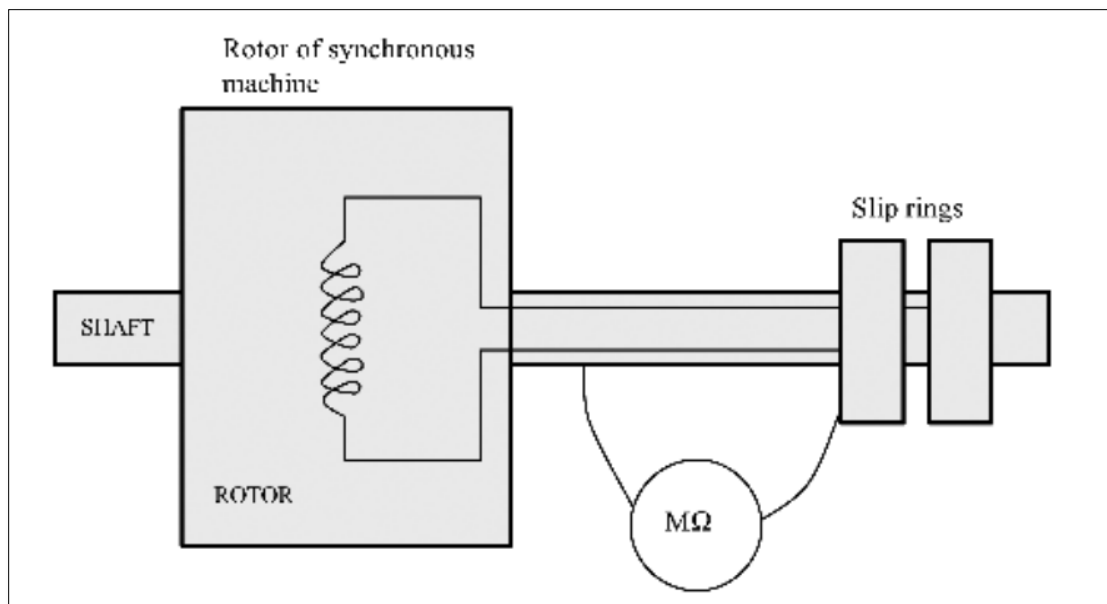
Nakon mjerenja, faze namotaja moraju biti uzemljene kako bi se preostali naboj ispraznio.

Isto tako, ispitivanje otpora izolacije polja rotora i stroja za uzbuđu iznosi 500 VDC. Prilikom ispitivanja namota rotora treba odspojiti četkicu sa kliznih prstena detektora zemljospoja, ako je moguće. Sljedeći korak je kratko spajanje ispravljača prije mjerenja i provjera jesu li izmjerene temperature statorskih namota kako bi se mogle koristiti kao referentna vrijednost za temperaturu rotorskih namota. Vrijednosti otpora izolacije koje su izmjerene pri različitim temperaturama nisu pouzdane, pogotovo ako su temperaturne razlike veće od 10 °C. Potrebni koraci su sljedeći:

- povezati Megger između namota i osovine rotora kako je prikazano na slici (23.)
- nakon mjerenja, potrebno je uzemljiti faze namota kako biste ih ispraznili.

Prilikom ispitivanja statorskih namota stroja za pobudu:

- isključiti kabele napajanja sa izvora napona.
- povežite mjerač otpora između statorskog namota i kućišta stroja (slika 23.)



Slika 26. Mjerenje otpora izolacije na rotoru i statoru uzбудnika

Izvor: ABB priručnik, Norwegian Cruising Line, 2005.

Kada su redovne vrijednosti ispitivanja otpora izolacije (izmjerene pri različitim temperaturama) upitne, ili tijekom godišnjeg remonta ili nakon većih popravaka, provodi se ispitivanje PI vrijednosti. Indeks polarizacije predstavlja omjer između vrijednosti otpora izmjerene nakon kontinuirane primjene ispitnog napona tijekom 10 minuta i vrijednosti izmjerene nakon primjene ispitnog napona tijekom 1 minute. PI vrijednost = 2,0 ili više smatra se zadovoljavajućom.³¹

Tablica 3. Ispitni napon i minimalna izolacija (Lloyd registar)

| Nazivni napon U_n V | Minimalni napon ispitivanja, V | Minimalni otpor izolacije, $M\Omega$ |
|--------------------------|-----------------------------------|---|
| $U_n \leq 250$ | $2 \times U_n$ | 1 $M\Omega$ |
| $250 < U_n \leq 1000$ | 500 V | 1 $M\Omega$ |
| $1000 < U_n \leq 7200$ | 1000 V | $(U_n/1000) + 1 M\Omega$ |
| $7200 < U_n \leq 15000$ | 2000 V | $(U_n/1000) + 1 M\Omega$ |

Izvor: Lloyd registar

³¹ **Dewan, H.:** *Safeties & applications of High voltage in Ships Mohd*, Bangladesh, 2014.

4.4. IZOLACIJA I UZEMLJENJE SUSTAVA

Postoje dvije metode za povezivanje visokonaponskog prekidačkog ormara na zemlju. Prva se naziva "Povezivanje na zemlju električnog kruga" i koristi se kada je potrebno raditi na ulaznom ili izlaznom dovodu kabela. U ovom slučaju, težak zemni spoj povezuje se sa zemljom na sva tri vodiča nakon što je prekidač kruga isključen iz pogona. Za ovu svrhu koristi se poseban ključ koji zaključava prekidač kruga u isključenom položaju, čime se osigurava sigurnost. Prekidač kruga ne može se ponovno uključiti dok se povezivanje na zemlju kruga ne ukloni.

Druga metoda naziva se "povezivanje na zemlju sabirnica" i primjenjuje se kada je potrebno raditi na određenom dijelu sabirnica. U tom slučaju, taj dio sabirnica mora se potpuno izolirati od svih mogućih električnih izvora, uključujući ulazne kabele generatora, sekcijske prekidače ili prekidače za spajanje na sabirnicama i transformatore. Sabirnice se zatim povezuju zajedno i povezuju na zemlju pomoću prijenosnih vodiča kako bi se osigurala potvrda da je povezivanje na zemlju postavljeno ispravno.

Ove metode su od glavnog značaja za siguran rad i izolaciju visokonaponskih ploča i komponenti sustava na brodu Norwegian Gem.

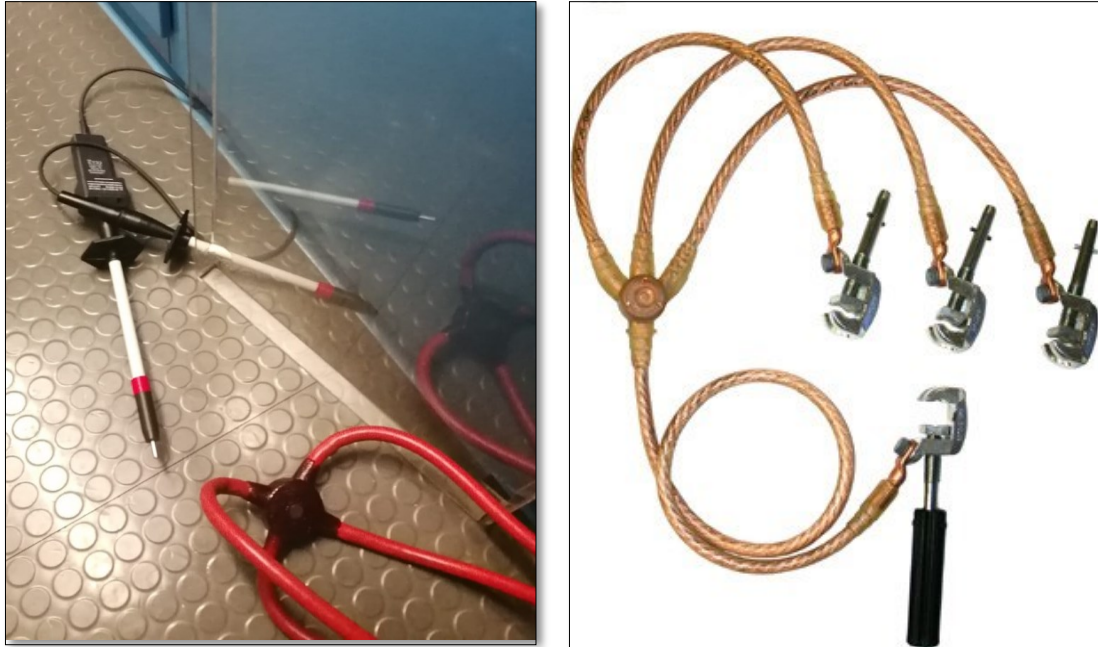
4.4.1. Izolacija viskonaponske ploče

U nastavku je prikazan postupak izolacije glavne viskonaponske ploče. Jako je bitno da se nikakvi drugi radovi, pa čak ni mjerenja, osim provođenja testiranja napona pomoću visokonaponskog ispitivača, nisu dozvoljeni dok sustav nije uzemljen. Radnik se niti u kojem slučaju ne smije približiti faznim vodičima niti ih dodirivati dok sistem nije uzemljen, bez obzira na to što je isključen iz napajanja. Kod prilaženja visokonaponskoj opremi, uvijek moraju biti prisutna najmanje dvojica članova posade; nikada samo jedan. Cilj je da jedan od njih ne dodiruje ništa, već pažljivo nadzire rad drugoga. Oba člana posade moraju biti obučena na tečaju za visoki napon. Prije nego što se izvrši uzemljavanje, nužno je provjeriti postoji li napon na toj dionici sustava ili uređaja. Tu provjeru je obavezno obaviti pomoću posebnog visokonaponskog ispitivača napona s dugačkom drškom.



Slika 27. Smještaj visokonaponskih ploča Norwegian Gem broda

Izvor: Norwegian Gem Engine Room (18.07.2023.)



Slika 28. Visokonaponski ispitivač (lijevo) i alat za uzemljenje „pauk“ (desno)

Izvor: Norwegian Gem Engine Room (18.07.2023.),

Uzemljavanje se obično provodi putem rastavljača. U slučajevima gdje uzemljavanje putem rastavljača nije predviđeno, kad je npr. mjesto rada daleko od točke izolacije ili kao što je slučaj s manje važnim krugovima, koristi se prijenosni kabel za uzemljenje s četiri kraja, poznat kao 'pauk'. Prvo se jedan kraj poveže s masom, nakon čega se preostala tri kraja spoje na svaku fazu koja se uzemljuje.

U nastavku slijedi liste sigurnosnih procedura rada i izolacije uređaja na visokonaponskim pločama Norwegian Gem broda. Prilikom svakog odrađenog koraka u procesu, bitno je ispuniti desnu kućicu s oznakom kvačice kako bi se mogao ispuniti sljedeći korak te procedura privela kraju u okvirima sigurnosti.

| SIGURNOSNI POSTUPAK | ✓ |
|--|---|
| 1. Potpisana „Dozvola za rad pod visokim naponom“ | |
| 2. Obavijestite kontrolnu prostoriju strojarnice i postavite znakove "Rad u tijeku" u prostoriji za upravljanje motorima i na oba MSB-a. | |

| IZOLIRANJE 11 kV PREKIDAČKIH ORMARA ZA DIZEL GENERATORE | ✓ |
|---|---|
| 1. Dizelski motori DG1, DG2 i DG3 su zaustavljeni. Potvrdite iz kontrolne prostorije strojarnice. | |
| 2. Blokirajte pokretanje motora DG1, DG2 i DG3 pomoću programske aplikacije. | |
| 3. Zatvorite i zaključajte ventile za startni zrak s lokotom. Otvorite ventile za odvod zraka. | |
| 4. Prebacite glavne prekidače za DG1, DG2 i DG3 u lokalni način rada na odgovarajućim REF jedinicama. | |
| 5. Potpuno izvucite prekidače za DG1, DG2 i DG3 i postavite znakove "Rad u tijeku". | |
| 6. Provjerite odsutnost napona na ulaznim kabelima putem LED indikatora na ploči ormara. | |
| 7. Zatvorite i zaključajte uzemljivački prekidač lokotom. Ključeve čuva Elektroinženjer zadužen za sigurnost. | |

| IZOLIRANJE 11 kV PREKIDAČKIH ORMARA ZA KOMPRESORE KLIME, POGON I MOTORE ZA MANEVRIRANJE | ✓ |
|--|---|
| 1. Provjerite jesu li svi motori zaustavljeni i prekidači su otvoreni. | |
| 2. Provjerite odsutnost napona na ulaznim kabelima putem LED indikatora na ploči ormara. | |
| 3. Potpuno izvucite prekidače i postavite znakove "Rad u tijeku". | |
| 4. Zatvorite i zaključajte uzemljivački prekidač lokotom. Ključeve čuva glavni časnik elektrotehnike zadužen za sigurnost. | |

| IZOLIRANJE 11 kV PREKIDAČKIH ORMARA ZA MOTORNI TRANSFORMATOR | ✓ |
|---|---|
| 1. Osigurajte da su podstanice ME10 i ME30 napajane iz M20 (držeci opterećenje unutar prihvatljivih granica). | |
| 2. Otvorite prekidač M10P13. | |

| | |
|---|--|
| 3. Otvorite prekidače sekundarnog strujnog kruga ME10-1Q1, ME10-2Q1 i ME10-3Q1 i osigurajte ih u otvorenom položaju lokotima. | |
| 4. Potpuno izvucite prekidač M10P13 i postavite znakove "Rad u tijeku". | |
| 5. Provjerite odsutnost napona na ulaznim kabelima putem LED indikatora na ploči ormara. | |
| 6. Zatvorite i zaključajte uzemljivački prekidač lokotom. Ključeve čuva Elektroinženjer zadužen za sigurnost. | |

| | |
|---|---|
| IZOLIRANJE 11 kV PREKIDAČKIH ORMARA ZA PODSTANICE | ✓ |
| 1. Osigurajte da su podstanice MD20 do MD70 napajane iz M20. | |
| 2. Otvorite prekidač M10P04. | |
| 3. Otvorite ručni prekidač MD20-1Q2 u podstanici MD20 i zaključajte ga u otvorenom položaju lokotom. | |
| 4. Potpuno izvucite prekidač M10P04 i postavite znakove "Rad u tijeku". | |
| 5. Provjerite odsutnost napona na ulaznim kabelima putem LED indikatora na ploči ormara. | |
| 6. Zatvorite i zaključajte uzemljivački prekidač lokotom. Ključeve čuva Elektroinženjer zadužen za sigurnost. | |

Prvo, kako bi se započeo postupak izolacije, obavezno je imati "Dozvolu za rad pod visokim naponom" koja se mora potpisati kako bi se osigurala pravilna provedba postupka. Također, važno je obavijestiti kontrolnu prostoriju strojarnice i postaviti znakove "Rad u tijeku" kako bi se osoblje upozorilo na prisutnost visokonaponskih aktivnosti u tom trenutku.

Nakon što su osigurani pravilni uvjeti i obavijest o radu, slijedi izolacija 11 kV prekidačkih ormara za različite dijelove broda, uključujući dizel generatore, kompresore klime, pogone i motore za manevriranje, te motorne transformatore i podstanice.

4.4.2. Izolacija glavnih generatora

Izolacija generatora na visokonaponskom sustavu broda ključan je sigurnosni postupak koji zahtijeva pažljivo planiranje i precizno izvođenje. Ovaj postupak osigurava zaštitu osoblja i opreme od visokonaponskih rizika tijekom održavanja i popravaka. U nastavku su detaljno opisani koraci koji se poduzimaju kako bi osigurali siguran rad u okolini visokog napona na brodu. Ovo uključuje izdavanje dozvole za rad pod visokim naponom, osiguravanje dizel motora, te specifične korake za izolaciju generatora i povezivanje uzemljivačkih kabela. Ovi koraci su ključni za održavanje sigurnosti i pouzdanosti visokonaponskog sustava na brodu.

| SIGURNOSNI POSTUPAK | ✓ |
|--|---|
| 1. Dozvola za rad pod visokim naponom | |
| 2. Obavijestite prostoriju za upravljanje motorima i postavite znakove "Rad u tijeku" u prostoriji za upravljanje motorima i na oba MSB-a. | |

| OSIGURAVANJE DIZEL MOTORA | ✓ |
|--|---|
| 1. Zaustavite generator. | |
| 2. Blokirate pokretanje motora putem programske aplikacije. | |
| 3. Zatvorite i zaključajte ventil za startni zrak lokotom. Otvorite ventil za odvod zraka. | |
| 4. Uključite uređaj za okretanje. | |

| IZOLIRANJE GENERATORA | ✓ |
|--|---|
| 5. Na ploči visokog napona, prebacite prekidač sa "Stand-by" na "Isključeno i zaključano". | |
| 6. Potvrdite da je prekidač otvoren i postavite znak "Radovi u tijeku". | |
| 7. Povucite prekidač. | |
| 8. Zatvorite i zaključajte uzemljivački prekidač lokotom. | |
| 9. Kod generatora: Otvorite kutiju za priključak kabela na generatoru. | |
| 10. Testirajte ispitivač visokog napona. | |
| 11. Provjerite napon na svakoj fazi pomoću ispitivača napona. | |

| | |
|--|--|
| 12. Povežite lokalni uzemljivački alat, prvo na uzemljivačku točku, a zatim na svaku fazu. | |
| *Zapamtite koristiti uzemljivački alat prilikom povezivanja uzemljivačkih kabela. Prilikom odspajanja, prvo odspojite svaku fazu, a potom uzemljivačku točku posljednju. Nakon završetka rada: Vratite sve u normalu obrnutim postupkom gdje je primjenjivo. | |

4.4.3. Osiguravanje propulzijske jedinice motora

Izolacija 11 kV prekidačkih ormara, kao i osiguravanje Azipod jedinice motora prije ulaska, predstavljaju ključne sigurnosne postupke koji se provode kako bi se osigurala sigurnost osoblja i opreme prilikom održavanja i upravljanja visokonaponskim sustavima na brodu.

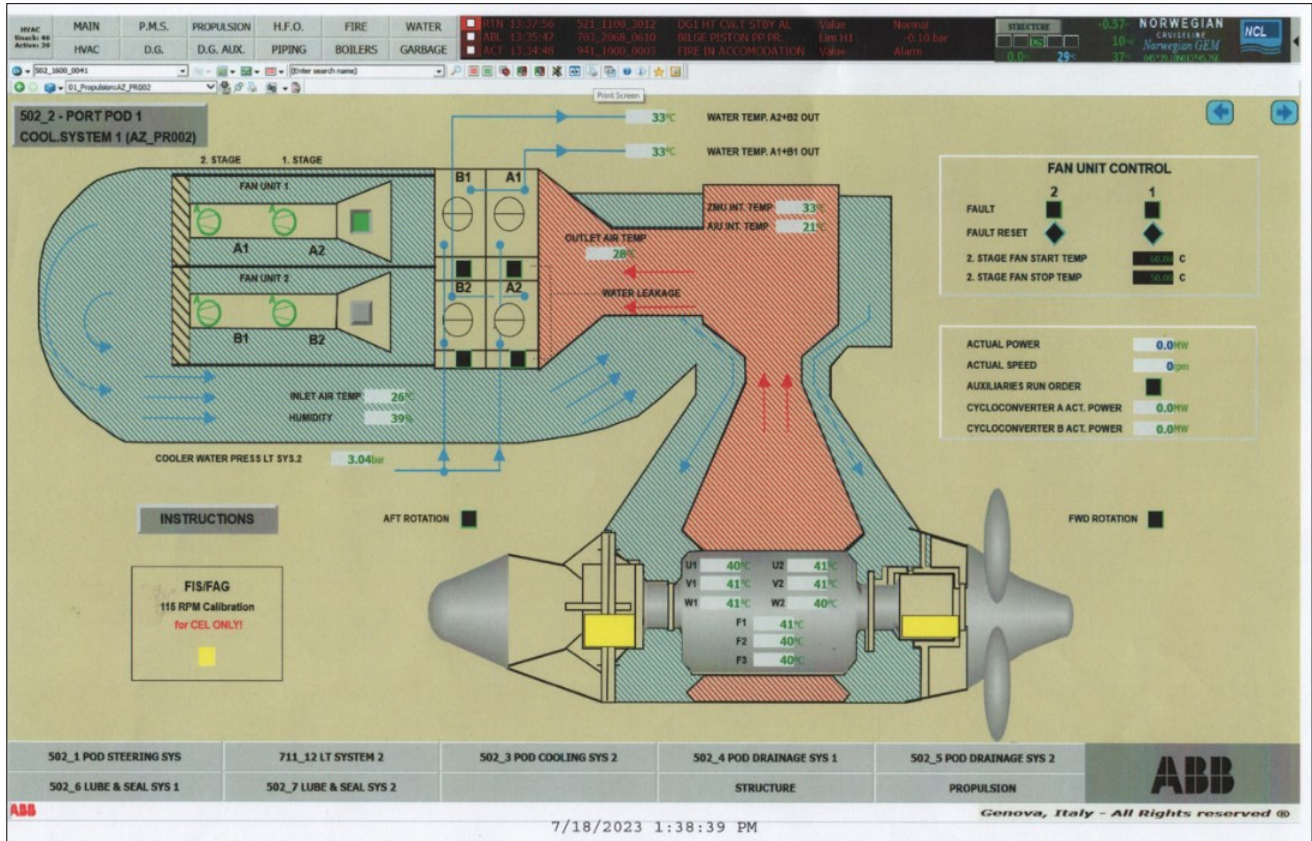
Pravilno izvođenje ovih koraka ima iznimnu važnost, te zahtijeva preciznost i strogo pridržavanje sigurnosnih mjera. U skladu s tim, otvaraju se i zaključavaju brzi strujni prekidači, a također se provode i druge radnje poput zaključavanja ventila za startni zrak i otvaranja uzemljivačkih sklopki, uz pripadajuće sigurnosne mjere i provjere.

| IZOLACIJA 11 kV PREKIDAČKIH ORMARA U GLAVNOJ PREKIDAČNICI 10 i 20 | ✓ |
|--|---|
| 1. Otvorite brzi strujni prekidač A i zaključajte ga lokotom. Ključeve čuva glavni časnik elektrotehnike zadužen za sigurnost. | |
| 2. Otvorite brzi strujni prekidač B i zaključajte ga lokotom. Ključeve čuva glavni časnik elektrotehnike zadužen za sigurnost. | |
| 3. Otvorite prekidače za ciklokonverter 1A i 1B (M20 portni motor) ili ciklokonverter 2A i 2B (M20 desni motor). | |
| 4. Zatvorite i zaključajte uzemljivačku sklopku na svakom prekidaču. Ključeve čuva glavni časnik elektrotehnike zadužen za sigurnost. | |
| 5. Na GOP panelu, potvrdite "BRZI PREKIDAČI I GLAVNI PREKIDAČI ISKLJUČENI". | |
| 6. Isključite i osigurajte pomoćne uređaje za propulziju; Ventilatori A1 i A2; ventilatori B1 i B2; pumpe za ulje ležaja propelera P1 i P2; pumpe za ulje potisnog ležaja P1 i P2. | |
| 7. Otvorite prekidač za pobudu na ciklokonverzijijskoj ploči (E1 i E2). | |

| | |
|--|--|
| 8. Testirajte ispitivač visokog napona na 690 V. | |
| 9. Testirajte napon namotaja A u ormariću broj. () | |
| 10. Testirajte ispitivač visokog napona na 690 V. | |
| 11. Povežite uzemljivačke kabele A (alarm za zemljospoj će se aktivirati). | |
| 12. Testirajte ispitivač napona na 690 V. | |
| 13. Testirajte napon namotaja B u ormariću broj. () | |
| 14. Testirajte ispitivač napona na 690 V. | |
| 15. Povežite uzemljivačke kabele B (alarm za zemljospoj će se aktivirati). | |

| | |
|--|---|
| OSIGURAVANJE AZIPOD MOTORA PRIJE ULASKA U JEDINICU | ✓ |
| Osiguranje motora i pomoćnih uređaja: | |
| 1. Blokirate i izolirate CO2 sustav gašenja požara. | |
| 2. Prebacite upravljanje u lokalni način rada. | |
| 3. Umetnite štap za blokadu kormilarskog uređaja ako je potrebno. | |
| 4. Isključite hidraulične jedinice za upravljanje (glavni prekidači u sobi za hidrauliku). | |
| 5. Povežite uzemljivačke kabele uzbudnih namotaja izravno na klizne prstenove. | |
| 6. Uključite kočnicu osovine. | |
| 7. Pažljivo provjerite inventar alata i dijelova koji su uneseni i izneseni u Azipod jedinicu. | |
| *Zapamtite koristiti uzemljivački alat prilikom povezivanja uzemljivačkih kabela. Prilikom odspajanja, prvo odspojite svaku fazu, a uzemljivačku točku posljednju. Po završetku rada: Vratite sve u normalni režim rada obrnutim postupkom gdje je primjenjivo. | |

Osiguranje Azipod motora prije ulaska u jedinicu također zahtijeva niz specifičnih koraka, uključujući blokadu i izolaciju CO2 sustava gašenja požara, prebacivanje na lokalni način rada, i pažljivu provjeru alata i opreme unesene i iznesene iz Azipod jedinice.



Schema 4. Sustav hlađenja Azipod jedinice

Izvor: Norwegian Gem Engine Control Room (18.07.2023.)

Ovi sigurnosni postupci su ključni za osiguranje sigurnog i učinkovitog održavanja visokonaponskih sustava i Azipod motora na brodu, a njihova pravilna provedba od vitalnog je značaja za zaštitu osoblja i opreme.

5. ZAKLJUČAK

Danas su visokonaponski sustavi na putničkim brodovima neizostavni segment pravilnog funkcioniranja elektroenergetskih zahtjeva koje razni potrošači postavljaju kao izazov posadi koja taj sustav održava. Postoje različite primjene i procedure rukovanja takvim sustavima, ali ovaj rad usmjerava pažnju na bolje razumijevanje istih na konkretnom primjeru postojećeg putničkog broda Norwegian Gem.

Proučavajući temeljne značajke visokonaponskog sustava, opisani su ključni kriteriji za kvalitetu električne energije i propise koji reguliraju izobličenje napona. Također, detaljno je analizirana klasifikacija naponskih veličina te mjere sigurnosti pri ispitivanju visokog napona i pravila rukovanja visokonaponskim sustavom.

Predstavljen je elektroenergetski sustav putničkih brodova koji pojašnjava različite izvore električne energije, uključujući dizel-generatore, generatore za nuždu i sustav besprekidnog napajanja. Također su objašnjeni rasklop i distribucija električne energije, uključujući glavnu rasklopnu ploču, visokonaponske transformatore, pretvarače frekvencije, visokonaponske strujne prekidače i brodsku kabelsku mrežu. Sukladno tome, razmotren je i sustav električne propulzije.

Kroz konkretan studij slučaja Norwegian Gema, opisana je konfiguracija strojarnice, proces održavanja generatora te mjerenje otpora izolacije kao i procesi uzemljenja sustava. Posebno su istraženi problemi i izazovi vezane uz paralelni rad generatora, postupak sinkronizacije i njihovu zaštitu i održavanje.

S druge strane, elektroenergetski sustav putničkog broda Norwegian Gem izuzetno je kompleksan i zahtjevan, s mnogim specifičnostima koje zahtijevaju pažljivo planiranje, održavanje i analizu. Kvaliteta električne energije, sigurnost te pouzdanost su od glavnog značaja za siguran i učinkovit rad ovakvih brodova.

Bez obzira na spomenute zahtjeve i probleme, danas su ravijene tehnologije i procedure zbog kojih se sigurnost posade i putnika dovela na visoke standarde i razine koje omogućuju uspješnost rukovanja i poslovanja na velikim putničkim brodovima.

LITERATURA

KNJIGE:

1. Giuffrida M., *Electrical Plants and Electric Propulsion on Ships*, 2019.
2. Mandić, Tomljenović, Pužar: *Sinkroni i asinkroni električni strojevi*, Zagreb, udžbenik 2012.
3. Milković, M.: *Brodski električni uređaji i sustavi*, udžbenik, Dubrovnik, 1996.

OSTALI IZVORI:

4. Tivić Đurović, M. , Komen, V., Čučić R.: *Istraživanje i utvrđivanje stanja kvalitete električne energije*, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2008.
5. M.H.J. Bollen.: *Power Quality aspects of Smart Grids, International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Granada, Španjolska, 2010.
6. Dewan, H.: *Safeties & applications of High voltage in Ships*, Bangladesh, 2014,
7. Schipman K., Delince F.: *The importance of good power quality*, ABB Power Quality Products
8. Vučetić, D.: *Brodski električni sustavi*, skripta za kolegij, Rijeka, 2015.
9. Cuculić A.: *Električni poriv broda*, skripta/prezentacija za kolegij, Rijeka, 2020.
10. Cuculić A.: *Brodski električni sustravi*, skripta/prezentacija za kolegij, Rijeka, 2021.
11. Bistrović, M.: *Ispitivanje brodskih električnih uređaja*, skripta za kolegij Rijeka, 2021.

INTERNET IZVORI:

12. <https://www.marineinsight.com/tech/generator/ways-of-starting-and-testing-emergency-generator/> (21.07.2023)
13. https://hpet.hr/kvaliteta_elektricne_energije/ (29.07.2023)
14. <https://dieselship.com/marine-technical-articles/marine-electro-technology/high-voltage-systems-on-ships/> (14.08.2023)
15. <https://www.slideshare.net/MohammudHanifDewan/safeties-applications-of-high-voltage-in-ships> (25.7.2023)

POPIS KRATICA

| Kratika | Puni naziv na engleskom jeziku | Tumačenje na hrvatskom jeziku |
|---------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| THDu | Total Harmonic Voltage Distortion | Ukupno harmoničko izobličenje napona |
| UPS | Uninterruptible power supply | Neprekidno napajanje |
| PMS | Power Management System | Sustav upravljanja energijom |

POPIS SLIKA

str.

| | |
|---|----|
| Slika 1. Ukupno dozvoljeno izobličenje napona THDu kod električne propulzije prema različitim normama klasifikacijskih društava..... | 19 |
| Slika 2. Sigurnosna oprema i alati prilikom rada na električnom sustavu..... | 23 |
| Slika 3. Visokonaponski ispitivač..... | 27 |
| Slika 4. Brodski visokonaponski sustav električne propulzije..... | 29 |
| Slika 5. Karakterističan dijagram specifične potrošnje goriva dizel-generatora..... | 31 |
| Slika 6. Sinkroni generator u praznom hodu..... | 32 |
| Slika 7. Sinkroni generator u kratkom spoju..... | 33 |
| Slika 8. Generator za nuždu..... | 35 |
| Slika 9. Primjer rasklopa brodske mreže..... | 38 |
| Slika 10. Sabirnice visokonaponske ploče..... | 40 |
| Slika 11. Polje glavne visokonaponske ploče s pripadajućim dijelovima..... | 41 |
| Slika 12. Pojednostavljeni prikaz direktnih i indirektnih pretvarača frekvencije..... | 43 |
| Slika 13. Sekvenca otvaranja kontakata HD4 prekidača..... | 44 |
| Slika 14. Dijelovi vakuumskog prekidača V-CONTACT..... | 45 |
| Slika 15. Vakuumski strujni prekidač VD4..... | 46 |
| Slika 16. Visokonaponska kabelska mreža..... | 48 |
| Slika 17. Visokonaponski energetska kabel s tri vodiča..... | 49 |
| Slika 18. Unutrašnjost potrupnog potisnika..... | 51 |

POPIS SHEMA **str.**

| | |
|---|----|
| Shema 1. Organizacija strojarnice Norwegian Gem-a..... | 53 |
| Shema 2. Sustav upravljanja i raspodjele energije – PMS..... | 55 |
| Shema 3. Preostala dostupna energija prije uključivanja novog generatora na mrežu..... | 58 |
| Shema 4. Sustav hlađenja Azipod jedinice..... | 77 |

POPIS TABLICA **str.**

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Dozvoljene granične vrijednosti propada napona ΔU_N i THDu prema IEEE-519-1992 standardu..... | 18 |
| Tablica 2. Primjer dijela test programa generatora..... | 63 |
| Tablica 3. Ispitni napon i minimalna izolacija (Lloyd registar)..... | 68 |

POPIS GRAFIKONA **str.**

| | |
|--|----|
| Grafikon 1. Primjer promjene napona uzrokovane promjenom opterećenja..... | 10 |
| Grafikon 2. Primjer treperenja napona..... | 11 |
| Grafikon 3. Primjer propada napona..... | 12 |
| Grafikon 4. Primjer prekida napona..... | 12 |
| Grafikon 5. Primjer prenapona..... | 13 |
| Grafikon 6. Primjer različitih vrsta tranzijenata..... | 13 |
| Grafikon 7. Primjer nesimetrije uzrokovane kvarom..... | 14 |
| Grafikon 8. Primjer valovitosti napona..... | 14 |
| Grafikon 9. Primjer pulsno broj u ispravljenom trofaznom naponu..... | 15 |
| Grafikon 10. Primjer harmonički izobličenog naponskog vala..... | 15 |