

# SIMULACIJA RADA BRODSKIH GENERATORA - PSIM PROGRAM

---

**Varvodić, Karlo**

**Graduate thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split / Sveučilište u Splitu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:439111>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-26**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Specijalistički diplomski stručni studij Elektrotehnike

**Karlo Varvodić**

**ZAVRŠNI RAD**

**Simulacija rada brodskih generatora-PSIM program**

Split, srpanj 2024.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Specijalistički diplomski stručni studij Elektrotehnike

**Predmet:** Izabrana poglavlja iz električnih strojeva

**ZAVRŠNI RAD**

**Kandidat:** Karlo Varvodić

**Naslov rada:** Simulacija rada brodskih generatora-PSIM program

**Mentor:** Maja Krčum

Split, srpanj 2024.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	2
2. SINKRONI STROJ .....	3
2.1. Dijelovi sinkronog stroja .....	3
2.1. Način rada sinkronog stroja .....	4
3. SINKRONI GENERATOR .....	6
4. PARALELNI RAD GENERATORA .....	10
4.1. Sinkronizacija električnih generatora .....	10
4.2. Raspodjela djelatne snage kW između dva dizelgeneratora .....	15
5. POWER SIMULATOR (PSIM) PROGRAM .....	17
6. SIMULACIJA PARALELNOG RADA DIZEL GENERATORA .....	20
6.1. Slučaj rada generatora u motorskom režimu rada .....	37
ZAKLJUČAK .....	43
LITERATURA .....	44
POPIS SLIKA .....	45

## **SAŽETAK**

### **Simulacija rada brodskih generatora-PSIM program**

U ovom radu analiziran je priključak sinkronog generatora na brodsku električnu mrežu, dijelovi generatora te se posebno piše o sinkronom generatoru koji se nalazi u brodskom sustavu. Cijela simulacija je napravljena u PSIM programu, koji omogućuje prikaz brodskog sustava opskrbe električne energije. Prikazani su grafički i numerički rezultati simulacije.

**Ključne riječi:** sinkroni generator, dizel generator, PSIM program, paralelni rad.

## **SUMMARY**

### **Simulation of operation of ship generators - PSIM program**

This paper analyzes the connection of the synchronous generator to the ship's electrical network, the parts of the generator, and specifically writes about the synchronous generator that is in the ship's system. The entire simulation was made in the PSIM program, which enables the presentation of the ship's electrical energy supply system. Graphical and numerical simulation results are presented.

**Keywords:** synchronous generator, diesel generator, PSIM program, parallel operation.

## 1.UVOD

Električni strojevi na brodovima počinju se koristiti početkom 19 stoljeća. Koristio se istosmjerni motor, na brodu SS Columbia. Istosmjerni sustavi koristili su se na većini brodova, a 1900. godina predstavlja prekretnicu i početak korištenja izmjeničnog sustava. Značajniju prekretnicu u elektrifikaciji brodova predstavljaju 50-e godine 20. stoljeća kada se prelazi na trofazni izmjenični sustav električne energije. Električna energija se na brodovima koristi za napajanje cijelog niza potrošača, pri čemu se nešto više od 70% proizvedene električne energije koristi za pogon elektromotora. Za proizvodnju trofazne izmjenične električne energije na brodovima služe trofazni sinkroni generatori s mogućnošću regulacije struje uzbude i brzine vrtnje za čiji se pogon koriste pomoćni dizel motori, glavni stroj te parne ili plinske turbine, a u novije vrijeme i obnovljivi izvori energije (energija sunca, vjetra) Brodovi su opremljeni i akumulatorskim baterijama koje se koriste kao pomoćni izvor napajanja.

Brodski elektroenergetski sustav može biti:

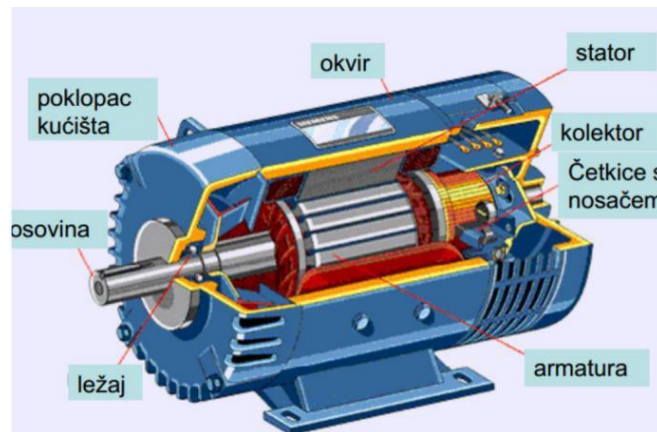
- Izmjenična mreža - niskonaponska – 110, 220, 380, 440, 600, 660 [V],
- Izmjenična mreža - visokonaponska- 3, 3.3, 6, 6.6, 10, 11, 15 [kV].

Frekvencija izmjenične mreže broskog sustava može biti 50 i 60 [Hz]. Mreže istosmjerne struje koje također mogu biti niskonaponske i visokonaponske. Cilj ovoga rada je prikazati i opisati paralelni rad sinkronih generatora pomoću Power Simulatora (PSIM ) programa te grafički prikazati raspodjelu električne snage, povećanja struja. [1] [3]

## 2. SINKRONI STROJ

Sinkroni stroj je električni stroj čiji se rotor vrti brzinom jednakom brzini okretnog magnetskog polja koje ga pokreće. Sinkroni stroj može raditi u motorskom i generatorskom režimu rada. U generatorskom režimu osovinu stroja okreće vanjski izvor mehaničkog rada, primjerice parna turbina, dizel motor, hidro turbina, vjetroagregat, a na statoru se inducira izmjenični električni napon, čime se mehanička energija pretvara u električnu energiju. U motorskom režimu je stator stroja priključen na trofaznu ili jednofaznu mrežu, a izmjenična električna struja stvara okretno magnetsko polje u jezgri elektromotora, zbog kojeg se rotor počinje okretati, jer rotor ima svoje magnetsko polje, pretvarajući električnu energiju u mehaničku. [3]

Na slici 1. je prikazan sinkroni stroj s njegovim dijelovima.



Slika 1. Sinkroni stroj.[5]

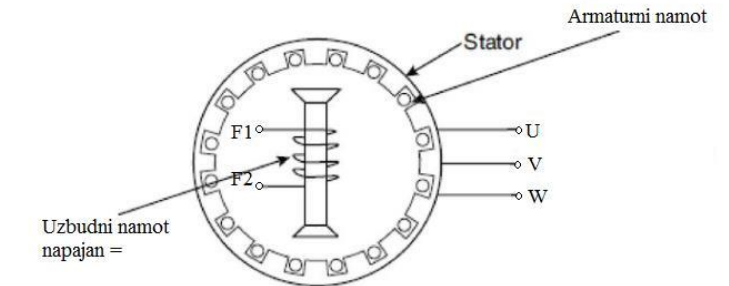
### 2.1. Dijelovi sinkronog stroja

Magnetski krug sinkronog stroja sastoji se, kao i kod svih rotirajućih električnih strojeva od: statora, s armaturnim namotom te rotora s uzbudnim namotom, uzbude sinkronog stroja.

Stator sinkronog stroja je vanjski, nepomični dio stroja, na kojeg je namotan armaturni namot, šuplji valjak sastavljen od tankih magnetskih limova s ravnomjernim utorima (prostori za vodiče) i zubima (prostori između susjednih utora) na unutarnjoj strani i složenih u oklopu statora. Faze armaturnog namota su prostorno razmaknute u trofaznoj mreži za 120 električnih stupnjeva. Armaturni namot inducira elektromagnetsko polje, koje djeluje na rotor sinkronog

stroja te mu omogućuje okretanje vratila, koji predaje određenu snagu, moment i brzinu radnom mehanizmu, prilikom rada u motorskom režimu. [5]

Na slici 2. je prikazan stator i elementarni namot sinkronog stroja.



Slika 2. Stator i elementarni namot sinkronog stroja. [2]

Rotor sinkronog stroja je dio elektromotora koji se okreće. Na njega je namotan uzbudni namot, kojim prolazi istosmjerna (DC struja), uzbudna struja, koja stvara statičko magnetsko polje za pokretanje rotora sinkronog stroja. Ponekad se umjesto uzbudnog namota koriste stalni (permanentni) magneti. Uzbudni namot nalazi se na rotoru sinkronog stroja kao što je prikazano na slici 2. Postoje dvije izvedbe rotora:

- rotor cilindrična oblika,
- rotor sa istaknutim polovima.

### 2.1. Način rada sinkronog stroja

U motorskom načinu rada, armaturnim namotom na statoru prolazi trofazna struja. Prolaskom kroz namote na statoru, izmjenična struja stvara okretno magnetsko polje unutar sinkronog stroja. Na rotoru uzbudni namot stvara statičko magnetsko polje, koje se zbog prisutnosti okretnog polja počinje vrtjeti za njim, pritom za sobom „vuče“ rotor sinkronog stroja. Motor se smatra sinkronim kada se rotor okreće brzinom okretnog magnetskog polja u nazivnim veličinama. Brzina vrtnje (broj okretaja)  $n$  ovisi o frekvenciji električne mreže na koju je elektromotor priključen  $f$ , te o broju magnetskih polova motora  $p$ , pri čemu je:  $n$  - brzina vrtnje (u okretajima u minuti),  $f$  - frekvencija električne mreže, a  $p$  - broj pari magnetskih polova



motora (2 pola = 1 par polova). Kako je broj pari polova prirodan broj, prema formuli (1) brzina vrtnje sinkronog stroja ovisi o broju polova motora. [2]

Jednadžbom je prikazana brzina vrtnje sinkronog stroja:

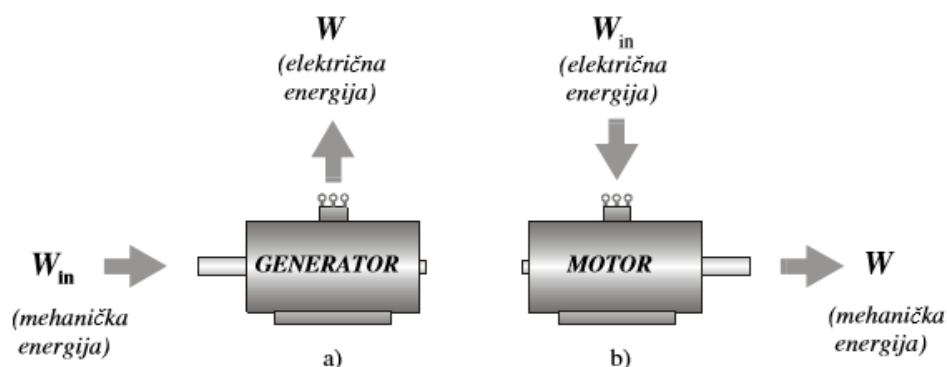
$$n = \frac{60 * f}{p} \quad (1)$$

Tako se dvopolni sinkroni stroj (jedan par polova) priključen na mrežu od 50 Hz okreće brzinom od 3 000 okretaja u minuti, četveropolni (dva para polova) se okreće brzinom 1 500 okr/min. Nije neuobičajeno da sinkroni stroj ima i 30, pa i više pari polova, zbog čega se sinkroni stroj sporo okreće. Takvi strojevi, korišteni kao generatori, najčešće nalaze primjenu u hidroelektranama.

U generatorskom načinu rada se događa obrnut proces u odnosu na motorski režim rada. Rotor je spojen na zajedničku osovinu s izvorom mehaničkog rada, npr. turbinom ili motorom s unutarnjim izgaranjem ili osovinom vjetroturbine. Kako se on vrti, s njim se vrti i njegovo magnetsko polje, kojeg stvara uzбудni namot, kojim prolazi istosmjerna struja.

Gledano sa položaja statora, to polje je okretno. Zbog toga se na statoru inducira napon koji slijedi polje rotora, a posljedično i struja. Frekvencija struje je određena brzinom vrtnje rotora, odnosno izvora mehaničkog rada te, ako je potrebno, podešava se brojem polova sinkronog stroja. [4]

Na slici 3. je prikazan opći princip rada sinkronog stroja, koji se može nalaziti i u generatorskom i motorskom režimu rada



Slika 3. Način rada sinkronog stroja u generatorskom i motorskom režimu rada. [2]

### 3. SINKRONI GENERATOR

Generator je električni stroj kojim se stvara električna energija. Ovisno o vrsti generatora, generatori mogu biti istosmjerni, izmjenični sinkroni ili asinkroni. Generatori mogu biti trofazni ili jednofazni. U brodskom elektroenergetskom sustavu se koriste trofazni sinkroni generatori koji su najčešće pokrećani pomoću dizel motora.

Na slici 4. je prikazan dizel generator na brodu.



Slika 4. Dizel generator. [3]

Brodovi također često, u današnje vrijeme, koriste dizelske generatore, ponekad ne samo za pomoćnu energiju za svjetla, ventilatore, vitla, itd., već i neizravno za glavnu propulziju broda. S električnim pogonom, generatori se mogu postaviti na prikladan položaj, kako bi se omogućio prijevoz više tereta, tj. da se ne zauzima puno prostora za teret.

Prema uzbuđi u uzbudnom krugu mogu biti:

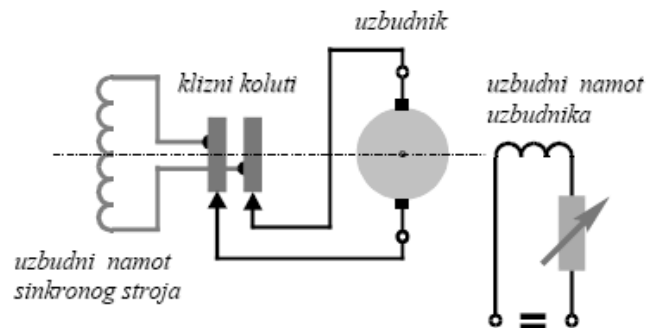
- nezavisno uzbuđeni,
- samouzbuđni.

Uzbuda sinkronog generatora služi da bi se stvorilo magnetsko polje, koje inducira na armaturni namot (statoru) sinkronog generatora, trofazne izlazne napone. Struja koja prolazi uzbuđnim namotom je istosmjerna. Kako bi se kreirali električni magneti na rotoru, namataju se vodiči

oko rotora, pomoću koji se stvara statičko magnetsko polje, koje je potrebno za rad sinkronog generatora.

Uzbuda sinkronog generatora se može izvesti kao dinamički sustav uzbude, statički sustav uzbude, beskontaktni sustav uzbude ili pomoću stalnih (premagnetnih) magneta. Dinamički sustavi uzbude su sustavi kojima se uzbudni namot sinkronog generatora napaja pomoću generatora istosmjerne struje. Istosmjerni uzbudnik ima svoj armaturni namot, koji je omotan oko rotora uzbudnika i koji stvara istosmjernu struju. S armature istosmjernog uzbudnika struja se prenosi na klizne kolute uzbudnog namota sinkronog generatora. Uzbudnik koji proizvodi istosmjernu struju električki je spojen na rotor sinkronog generatora, tj. na uzbudni namot. Rotor sinkronog generatora se sastoji od vodiča koji su namotani na način da tvore magnetske polove, odnosno imaju svrhu stvaranja magnetskog polja. Na armaturi sinkronog generatora se inducira elektromotorna sila, odnosno napon. Prilikom rada, električna energija se predaje mreži. Slaba je strana ovog rješenja u kolektoru uzbudnika.

Na slici 5. je prikazan dinamički sustav uzbude sinkronog generatora.



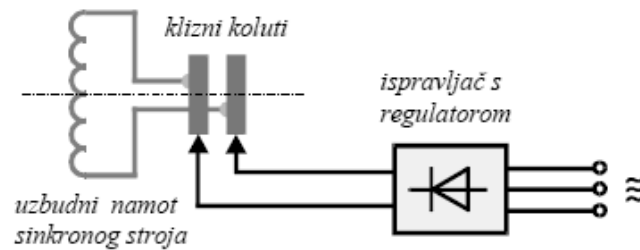
Uzbudni sistem s istosmjernim uzbudnikom

Slika 5. Dinamički sustav uzbude [2]

Statički sustavi uzbude se koriste u slučaju kad je izvor istosmjerne struje pretvarač energetske elektronike, koji se sastoji od poluvodičkih dijelova, kao što su diode, regulatori napona, otpornici. Izvor koji dolazi na ispravljač je trofazna struja, fazno razmaknuta za  $120^\circ$  koja se ispravlja u istosmjernu struju pomoću poluvodičkih dioda. Istosmjerna struja odvodi se sa ispravljača na klizne kolute, ali prije koluta provodi se kroz regulator napona, kojim se

kontrolira napon uzbude. Klizni koluti predstavljaju plus i minus te se tako određuje smjer struje koja napaja rotor sinkronog generatora, kako bi se postiglo magnetsko polje za rad sinkronog generatora. [2] [5]

Na slici 6. je prikazana statička uzbuda sinkronog generatora.



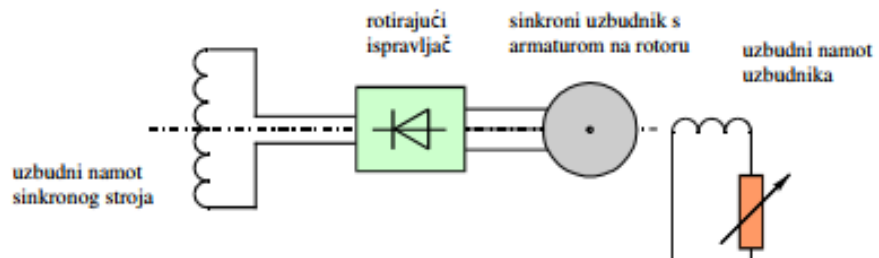
Statička uzbuda

Slika 6. Statička uzbuda sinkronog stroja [4]

Beskontaktna uzbuda sinkronog generatora se ne koristi na brodovima. Ovakva vrsta uzbude koristi mali sinkroni generator koji ima uzbudu na statoru, a armaturni namot na rotoru sinkronog generatora koji napaja. Uzbudnik (pomoćni generator) je zajedno s ispravljačkim uređajem montiran na osovinu sinkronog generatora i s njim se zajedno vrti.

Armatura uzbudnika je preko ispravljačkog uređaja spojena s uzbudnim namotom sinkronog generatora. Regulacija uzbudne struje se postiže regulacijom uzbude pomoćnog generatora. Prednost je ovog rješenja to što ne zahtijeva ni kolektor ni klizne prstene pa traži manje održavanja. Koristi se za uzbudu manjih sinkronih generatora, koji rade samostalno na vlastitoj mreži, npr. male hidroelektrane, manji industrijski pogoni. [2] [5]

Na slici 7. je prikazana beskontaktna uzbuda sinkronog generatora.



Slika 7. Beskontaktna uzbuda sinkronog generatora. [2]

## 4. PARALELNI RAD GENERATORA

Brodski sustav mora imati toliko generatora da pri ispadu iz pogona bilo kojeg od njih preostala snaga bude dovoljna za sigurnu plovidbu. Paralelni rad generatora primjenjuje se zbog prilagođavanja proizvodnje električne energije, preciznije broja priključenih generatora, trenutačnim potrebama potrošnje u različitim fazama eksploatacije broda. Potrošnja električne energije se razlikuje zavisno od toga je li brod u plovidbi, manevrira, prekrcava teret ili je na sidru. Tijekom priključenja sinkronog generatora na brodsku električnu mrežu, u paralelni rad uključuje se više generatora nego što je prema trenutačnoj, čak i očekivanoj, potrošnji potrebno, kako bi se povećala sigurnost napajanja električnom energijom. Vezano za očekivanu potrošnju, u manevru mora biti priključeno dovoljno generatora za uključivanje i nesmetan rad propulzora, kako bi ga se po potrebi u svakom trenutku moglo uključiti.

Isto tako, uključivanjem jednog generatora više od potrebnog broja, povećava se raspoloživost elektroenergetskog sustava tako da bez prekida u napajanju može proizvoditi dovoljno energije čak i u slučaju iznenadnog ispada iz pogona jednog od generatora. [1] [3]

Korištenjem većeg broja generatora koji se po potrebi uključuju na mrežu u paralelni rad postiže se dakle rad pogonskih strojeva u području većih opterećenja i time smanjenje potrošnje goriva. Problematika paralelnog rada obuhvaća:

- sinkronizaciju,
- raspodjelu djelatne snage. [kW]

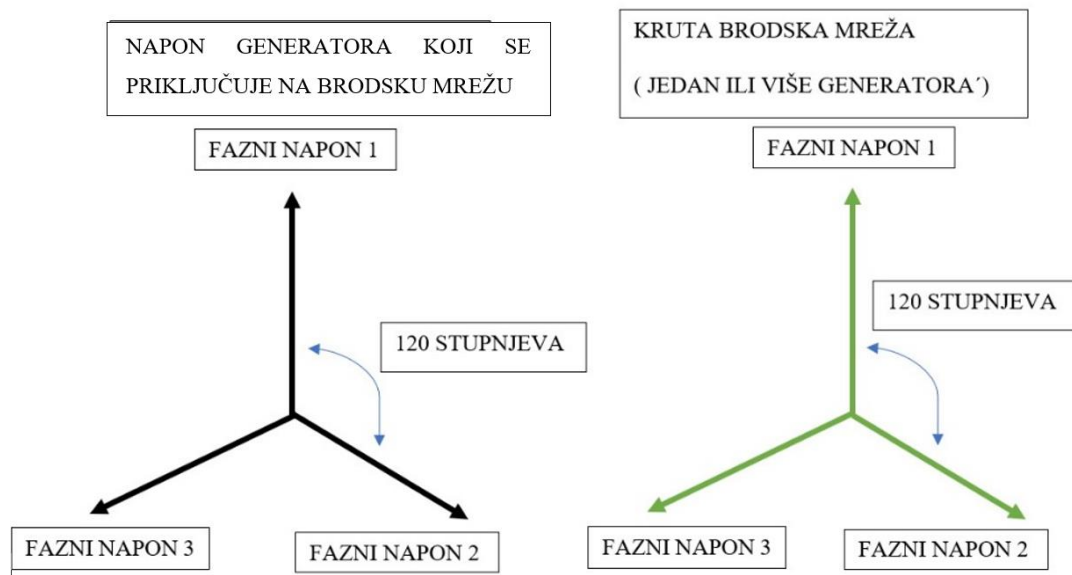
### 4.1. Sinkronizacija električnih generatora

Sinkronizacija generatora je postupak uključivanja sinkronog generatora na brodsku mrežu tj u paralelni rad s drugim generatorom /generatorima. Nakon što su ispunjeni važni uvjeti odvija se proces uključivanja prekidača. Svako isključivanje ili uključivanje većih trošila tijekom sinkronizacije utječe na ravnotežu sustava i produljuje vrijeme trajanja sinkronizacije generatora.

Uvjeti koji su potrebni zadovoljiti kako bi električni generator radio paralelno s brodskom mrežom su:

- isti redoslijed faza generatora i brodske mreže,
- jednak iznos napona generatora i brodske mreže,
- približno jednake frekvencije napona generatora i brodske mreže,
- napon generatora i brodske mreže su fazi (kut opterećenja).

Na slici 8. je prikazana naponska vrijednost generatora i krute mreže.



Slika 8. Naponske vrijednosti generatora i krute mreže.

Isti redoslijed faza svih ugrađenih generatora ostvaruje se prilikom gradnje broda. Podešavanje induciranog napona generatora prije sinkronizacije na vrijednost jednaku naponu mreže vrši se regulacijom struje uzbude preko automatskog regulatora napona, dok se približna jednakost frekvencije i istofaznost postižu regulacijom goriva preko regulatora broja okretaja stroja koji pogoni generator (na brodu je to najčešće dizel motor). Kruta mreža broskog elektroenergetskog sustava predstavlja mrežu na koja već ima svoju vrijednost napona i frekvencije, koja je konstantna. Kruta mreža može se sastojati od jednog ili više generatora u paralelnom radu. Generator koji se sinkronizira i priključuje na brodsku mrežu treba se imati veću frekvenciju od postojeće frekvencije krute mreže, kako bi nakon uključivanja prekidača odmah preuzeo opterećenja. U suprotnom bi povukao snagu iz mreže i počeo raditi kao motor te dodatno opteretio ostale generatore. Sinkronoskop i sinkronizacijske lampe služe za određivanje trenutka kada su napon generatora kojeg sinkroniziramo i napon mreže u fazi tj.

kada između njih nema faznog pomaka (istofaznost), pa se može uključiti generatorski prekidač, odnosno izvršiti sinkronizacija. [1] [3] [2]

Na slici 9. je prikazana kontrolna ploča sa opremom za sinkronizaciju.

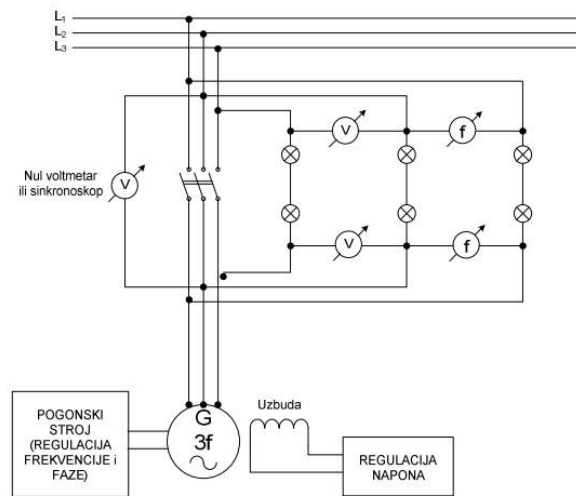


Slika 9. Kontrola ploča. [3]

Davno prije za provjeru uvjeta sinkronizacije koristile sinkronizacijske lampe u tamnom spoju, dok se danas to radi isključivo korištenjem sinkronoskopa. Lampe u tamnom spoju spojene su, po dvije u seriju za svaku fazu, paralelno kontaktima generatorskog prekidača, sve su ugašene kada je generator u fazi s mrežom. Jednakost napona i frekvencije provjerava se dvostrukim voltmetrom, odnosno dvostrukim mjerilom frekvencije. [1] [3]



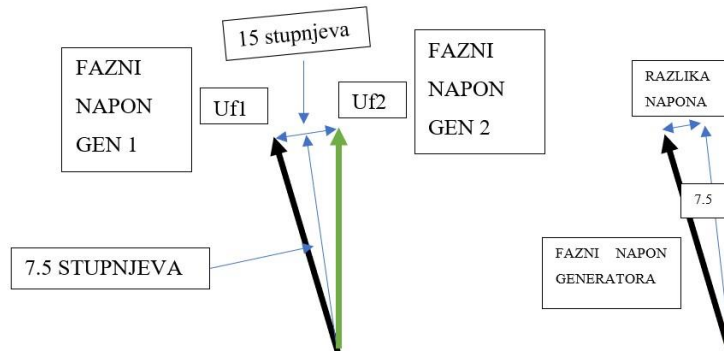
Na slici 10. je prikazana shema tamnog spoja.



Slika 10. Shema spajanja lampi za provjeru istofaznosti napona. [3]

Danas su gotovo svi brodovi opremljeni uređajima za automatsku sinkronizaciju, tako da se ručna sinkronizacija radi samo u slučaju kvara na automatici. Ako se generatorski prekidač uključi u trenutku kada navedeni uvjeti nisu dovoljno precizno ispunjeni, dolazi do pogrešne sinkronizacije koja potjera veliku struju izjednačenja i može imati izuzetno ozbiljne posljedice.

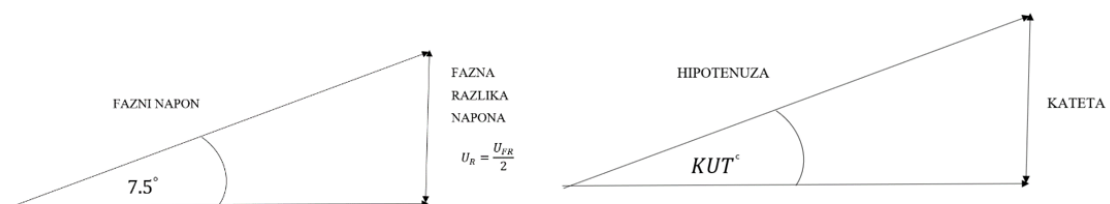
Na slici 11. je prikazana fazna vrijednost napona dizel generatora.



Slika 11. Fazne vrijednosti napona dizel generatora.

U slučaju rada dva generatora, koji imaju faznu vrijednost napona, koji iznosi 3640 [V] te ako je reaktancija oba generatora jednaka 0.5 [ $\Omega$ ], prilikom uključanja na paralelan način rada ako su fazni naponi pomaknuti za 15 [ $^\circ$ ], dolazi do kratkog spoja, tj. povećava se struja nekoliko puta veća od nazivne vrijednosti te dolazi do preopterećenja generatora. Pomoću Pitagorinog poučka i sinusne vrijednosti, dobit će se vrijednost razlike napona između dvije faze.

Na slici 12. je prikazan fazni dijagram iz kojeg se očitava razlika napona



Slika 12. Fazni dijagram.

Razlika napona može se označiti kao  $\frac{U_{FR}}{2}$ , fazni napon generatora kao  $U_f$  te je njegova vrijednost jednaka 3640 [V]. Sinusna funkcija prikazuje sinus kuta između razlike napona koja se uzima da bude kateta pravokutnog trokuta, podijeljena na pola, a fazni napon generatora bude hipotenuza. Kut između dvije fazne vrijednosti napona iznosi 15 $^\circ$ .

Kada se očitaju fazni naponi i njihov pomak, vrijednosti se uvrštavaju u formulu

$$\sin(7.5) = \frac{\text{RAZLIKA NAPONA}}{\text{FAZNI NAPON GENERATORA}} = \frac{U}{U_f} \quad (2)$$

Za određivanje razlike napona potrebno je pola vrijednosti razlike napona što iznosi:

$$U = \sin 7.5 * U_f * 2 \quad (3)$$

te nakon uvrštavanja u jednadžbu vrijedi da je razlika napona jednaka:

$$U = \sin(7.5)^\circ * 3640 * 2 = 950 [V] \quad (4)$$

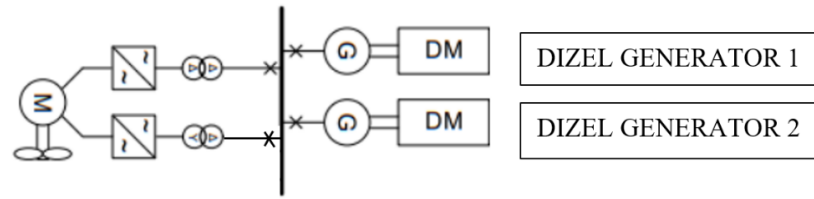
te se tada vrijednost uvrsti u omhov zakon:

$$I = \frac{U}{X_g} = \frac{950}{0.5} = 1900 [A] \quad (5)$$

Zbog velikih struja, koje se javljaju prilikom loše procjene uključivanja prekidača, dolazi do velikih sila među namotima u najgorem slučaju može doći do njihovog trganja, zaustavljanja osovine pogonskog stroja i uništenja generatora.

#### **4.2. Raspodjela djelatne snage kW između dva dizelgeneratora**

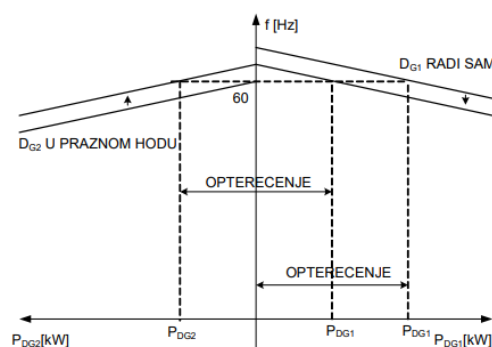
Prije i neposredno nakon sinkronizacije svo opterećenje je držao dizel generator 1. Nakon sinkronizacije novopriključeni generator dizel generator 2 radi bez opterećenja. Na slici 13. je prikazana blok shema dva dizelgeneratora.



Slika 13. Blok shema dva dizel generatora. [4]

Da bi preuzeo dio opterećenja komandom RISE (povećanje) je automatskom regulatoru broja okretaja njegovog dizel motora podignuta karakteristika  $f(P)$ , koja povećava frekvenciju dizel generatora 2, uz adekvatno spuštanje iste frekvencije na dizel generatoru 1 komandom LOW (smanjenje), smanjenjem broja okretaja dizel motora, regulacijom dovoda goriva u sustav, kako bi se zadržala konstantna frekvencija. Ukupno opterećenje (potrošnja trošila priključenih na brodsku mrežu) koje se nije promijenilo sada je ravnomjerno raspoređeno između dizel generatora 1 i dizel generatora 2. Kod uključanja ili isključenja većeg trošila dolazi do brze raspodjele opterećenja koja ovisi o nagibu karakteristika opterećenja. Postoje i drugačije opcije raspodjele opterećenja, najčešće se nadređena automatika postavlja na jednako opterećenje svih generatora u paralelnom radu jer je u tom slučaju trenutna opteretivost dizel generatora, uključivanjem novog potrošača, najveća. U suprotnom bi se moglo dogoditi da generator koji nosi veće opterećenje, uzevši u trenutku uključanja novog trošila jednaki dio snage dođe u preopterećenje dok bi drugi generator još imao rezerve snage. [1] [3]

Na slici 14. je prikazana raspodjela djelatnog opterećenja u slučaju dva jednaka dizelgeneratora s jednako podešenim statičkim karakteristikama regulacije

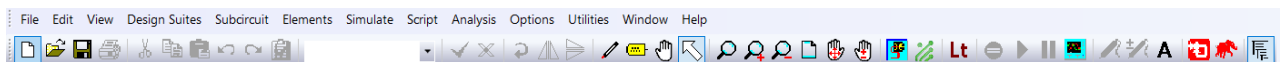


Slika 14. Shema ovisnosti frekvencije o djelatnoj snazi. [3]

## 5. POWER SIMULATOR (PSIM) PROGRAM

PSIM (Power Simulator) program je softverski paket za simulaciju električnih krugova, dizajniran posebno za korištenje u simulacijama energetske elektronike i pogona motora, ali se može koristiti za simulaciju bilo kojeg električnog sklopa. PSIM program koristi analizu i integraciju trapeznih pravila kao osnovu svog algoritma za simulaciju. PSIM pruža shematsko sučelje za snimanje i *Simview* preglednik valnog oblika. PSIM ima nekoliko modula koji proširuju njegovu funkcionalnost na specifična područja simulacije i dizajna energetskih krugova, uključujući teoriju upravljanja elektromotora, fotonaponskih sustava i vjetroturbine. PSIM program se koristi u industriji za istraživanje i razvoj proizvoda, a koriste ga obrazovne institucije za istraživanje i nastavu. Kako bi se započeo rad u PSIM programu, potrebno je u izborniku koji se nalazi u gornjem lijevom kutu stisnuti bijelu ikonu koja označava novi list. [7]

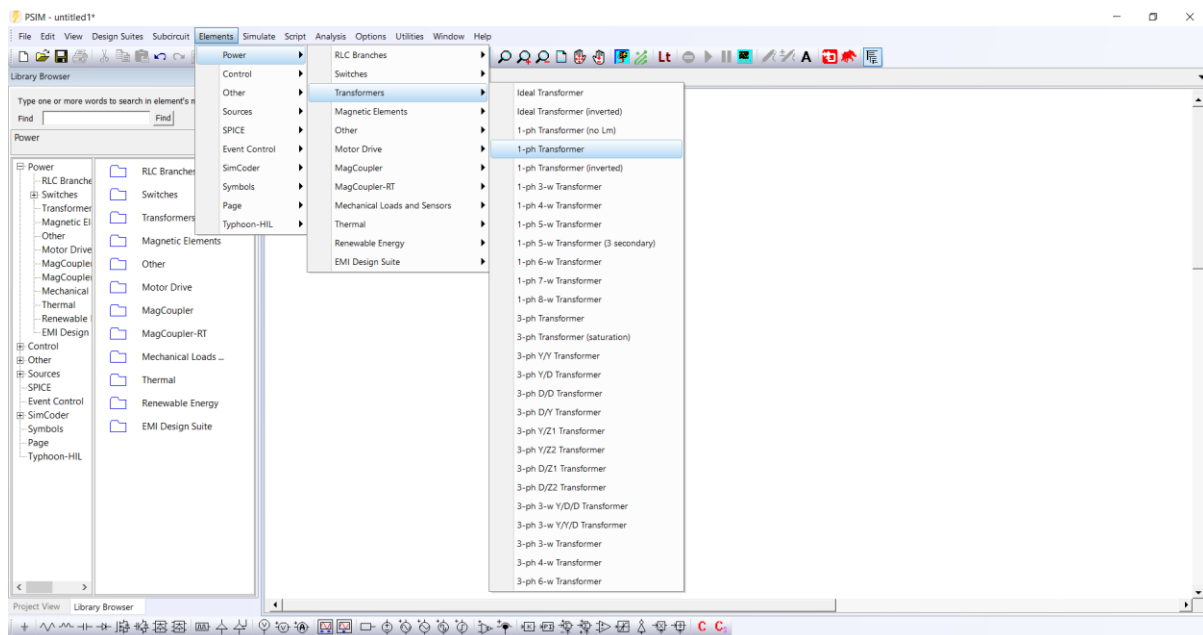
Na slici 15. je prikazan alatni izbornik u PSIM programu.



Slika 15. Izbornik alata u PSIM programu. [7]

U izborniku se nude mnogi alati koji služe za sastavljanje električnih krugova. U ponudi je alat za spremanje slike, alat za spremanje datoteke, alat za crtanje, alat za pomicanje predmeta, alat za uvećavanje i smanjivanje zaslona, što omogućuje bolji rad, te izbornik za simulacije električnih krugova. Kada se počinje sastavljanje električnog kruga, potrebno je u izborniku radne površine PSIM programa unutar taba *Elements* odabrati željenu kategoriju i objekt, primjerice u kategoriji elemenata snage odabrati skupinu *Transformers* te odabrati željeni, npr. jednofazni transformator, kao što je prikazano na slici 18. Program u svojoj bazi elementa nudi velik izbor objekata, primjerice objekte koje predstavljaju izvore električne energije, sklopke, transformatore, otpornike, kondenzatore, zavojnice, alate za mjerenje napona i struje, itd. [7]

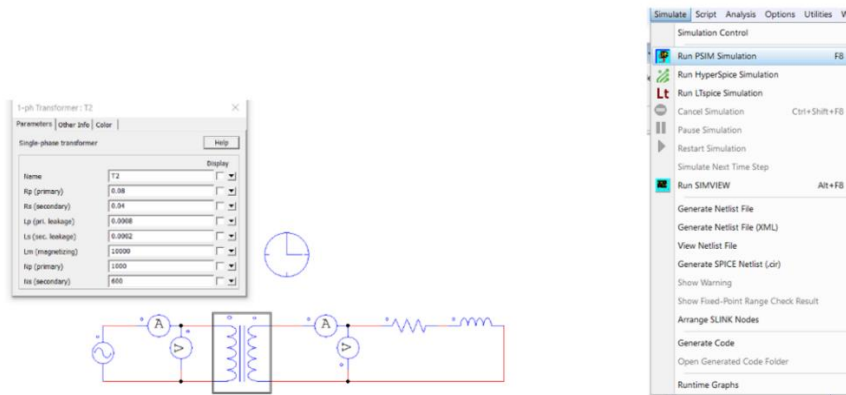
Na slici 16. je prikazan izbornik u PSIM programu.



Slika 16. Izbornik elemenata u PSIM programu. [7]

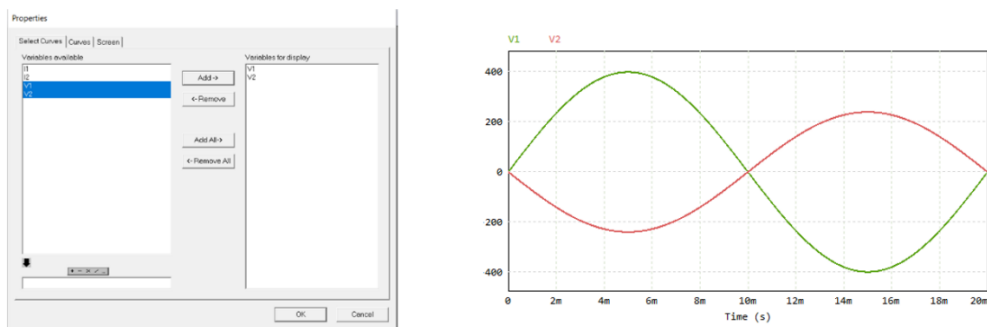
Parametrima elemenata u simulaciji može se lako pristupiti dvoklikom na sam element u prostoru modela, po čemu se otvara iskočni prozor u kojem se isti mogu mijenjati, na primjer jednofaznog transformatora prema slici 17. Kada se kreira određen strujni krug, za pokretanje simulacije potrebno je odabrati opciju *Run PSIM Simulation* unutar taba *Simulate*, prema slici 17. Dodatno, za vremenske dijagrame, može se u prethodnom koraku odabrati vrijeme trajanja simulacije odabirom *Simulation control* opcije unutar istog taba, po čemu se pojavi oznaka sata u samom modelu. Za sinusne veličine iz primjera odabrano je 20 [ms]. [7]

Na slici 17. prikazana je shema i početak pokretanja simulacija.



Slika 17. Shema u PSIM programu i početak pokretanja simulacije. [7]

Po pokretanju simulacije otvori se iskočni prozor *Properties*, prema slici 17. te je u njemu potrebno odabrati veličine koje se žele prikazati, klikom na njihove oznake u lijevom dijelu ekrana te na tipku *Add->*. Na slici 18. dan je primjer pregleda rezultata.

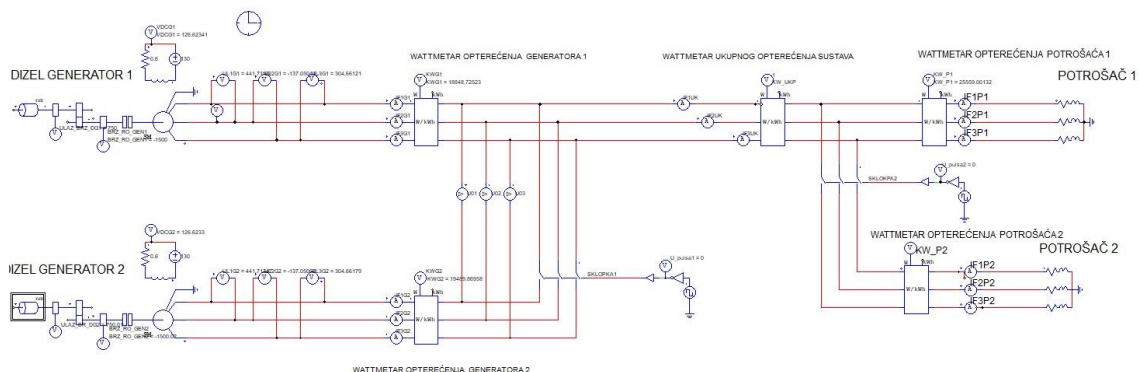


Slika 18. Primjer odabira veličina i pregleda rezultata. [7]

## 6. SIMULACIJA PARALELNOG RADA DIZEL GENERATORA

U ovom se poglavlju je simuliran rad dva dizel generatora u paralelnom radu. Pomoću PSIM programa prikazana je osnovna shema paralelnog rada dva dizel generatora, na koje su priključeni određeni potrošači, mjerni instrumenti, koji mjere napon i struju te ostali elementi koji se nalaze u radu. Simulacijom će se prikazati promjene struja dizel generatora 1, dizel generatora 2, linijske napone dizel generatora 1 i dizel generatora 2. Simulacijom će se prikazati promjene napona, struje i opterećenja prilikom rada dizel generatora 1 i dizel generatora 2. Na početku simulacijskog procesa će se prikazati dizel generator 1. Nakon nekog vremena će se na mrežu paralelno priključiti još jedan trofazni potrošač, radno-induktivnog karaktera. Nakon uključjenja još jednog potrošača, uključit će se dizel generator 2, kako bi preuzeo opterećenje.

Na slici 19. prikazana je shema paralelnog rada dva dizel generatora na koje su priključeni potrošači 1 i 2.



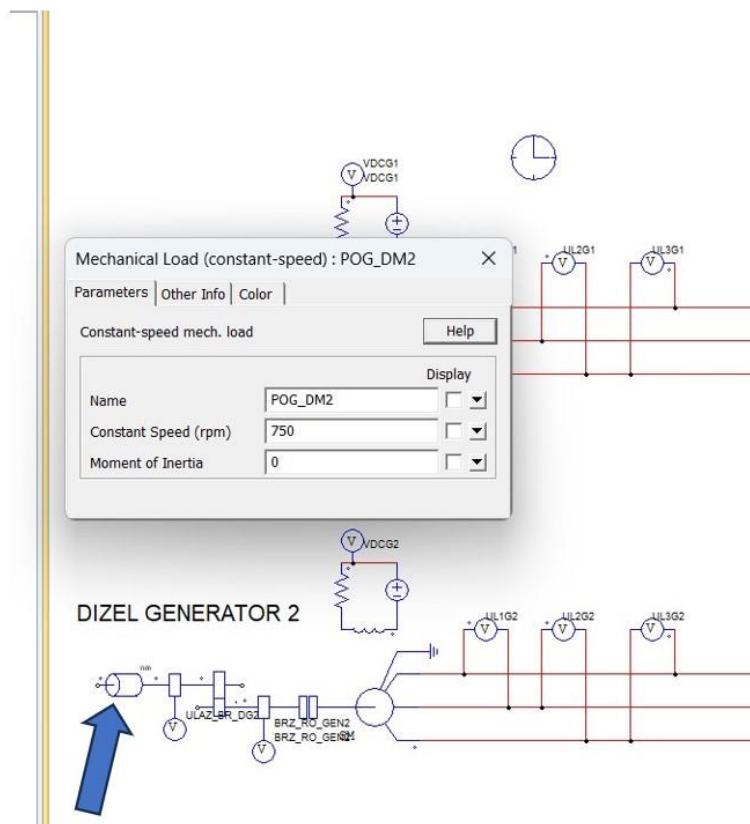
Slika 19. Shema simulacije.[8]

Glavni dio u proizvodnji električne energije u brodskom sustavu su dizel generatori. U ovoj simulaciji nalaze se dva dizel generatora, koji sadrže mehaničke izvore, koji imaju konstantnu brzinu vrtnje osovine. U ovoj simulaciji konstantna brzina vrtnje iznosi 750[o/min], koju stvara mehanički izvor, u ovom slučaju dizel generator, te moment inercije 10 [kg/m<sup>2</sup>], simulacija je odrađena tako da se na izlazu prijenosnika snage postigne željena brzina za nazivan rad generatora, u ovom slučaju 1500 [o/min], te da se brzina može povećavati prilikom upuštanja u paralelni rad generatora.



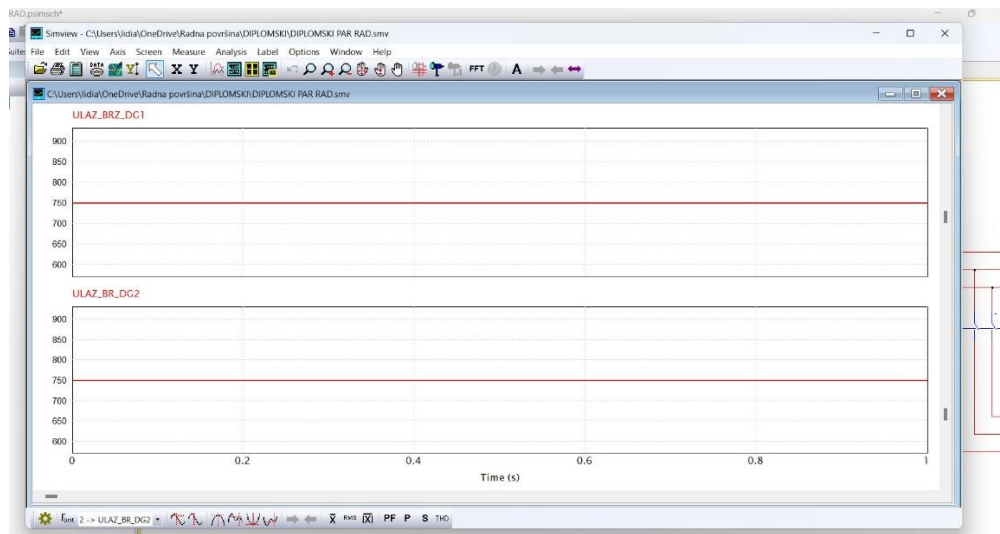
U simulaciji se još nalazi senzor brzine koji se nalazi između pogonske osovine i prijenosnika snage (multiplikator). Na senzor brzine se priključuje voltmetar preko kojeg se grafički prikaže brzina vrtnje mehaničkog izvora. U simulaciji se nalaze dva mehanička izvora, koje imaju jednake brzine vrtnje i moment inercije. Simulacija je odrađena tako da se na izlazu prijenosnika snage postigne željena brzina, u ovom slučaju 1500 [o/min], te da se brzina može povećavati prilikom upuštanja u paralelni rad generatora.

Na slici 20. prikazan je mehanički izvor(dizel motor), koji pokreće generator.



Slika 20. Mehanički izvor. [8]

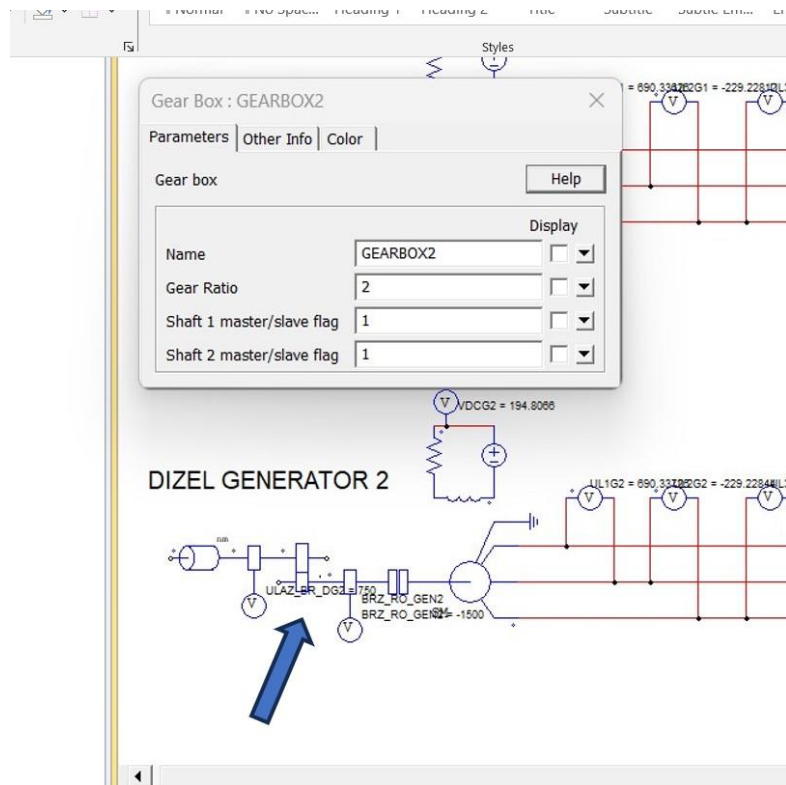
Na slici 21. prikazana je brzina vrtnje mehaničkog izvora dizel generatora 1 i dizel generatora 2, koja je u ovom slučaju 750[o/min]



Slika 21. Brzina vrtnje mehaničkog izvora. [8]

Nakon senzora brzine, dolazi se na prijenosnik snage(multiplikator), čiji je prijenosni omjer jednak 1:2, što govori da ako je brzina vrtnje pogonske osovine, u ovom slučaju simulacije 750 [o/min], koja ulazi u prijenosnik snage, na izlazu prijenosnika, na izlaznoj osovini bit će brzina vrtnje, koja će pogoniti rotor generatora, iznositi 1500[o/min], da bi se osigurao nazivan rad generatora. Senzor brzine se isto nalazi na izlaznoj osovini, koja pogoni generator.

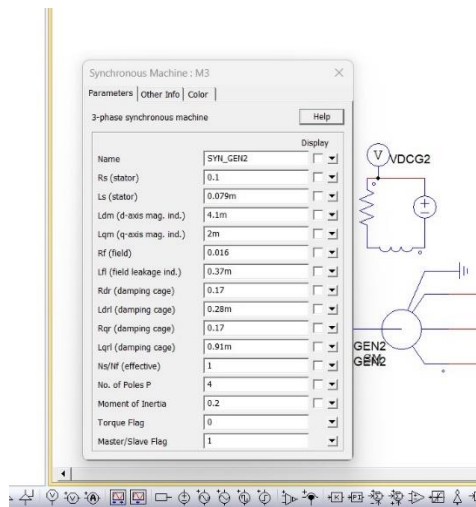
Na slici 22. prikazan je prijenosnik snage(multiplikator) prijenosnog omjera 1:2.



Slika 22. Prijenosnik snage(multiplikator). [8]

Na izlaznu osovinu se spaja generator između kojeg se nalazi spojka, koja će omogućiti kruti spoj između mehaničkog izvora i generatora. U ovoj simulaciji će se koristiti trofazni generator sa statičkom uzбудom. Za statičku uzбудu potrebno je imati pomoćni izvor električne energije, koji će napajati uzbudni namot sinkronog generatora. Na statorskom namotu se nalaze krajevi i početci, koji mogu biti spojeni u spoj zvijezda ili trokut. U ovom slučaju će se prikazati samo izlazne tri faze radi jednostavnijeg prikaza simulacije.

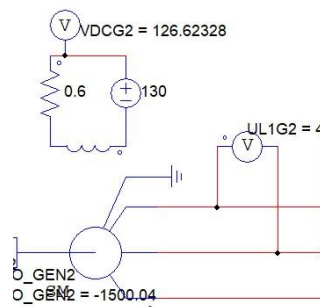
Na slici 23. prikazani su električne parametre dizel generatora 1 i dizel generatora 2.



Slika 23. Električni parametri dizel generatora. [8]

Sa slike 23. se može očitati da djelatni otpor statorskog namota iznosi 0.1 [Ω], induktivni otpor statorskog namota iznosi 0.0079 [mΩ]. Broj polova, koji se nalaze na rotoru, je 4. Prema broju polova može se zaključiti da je nazivna brzina vrtnje rotora, iznosi 1500[o/min]. Oba generatora imaju iste električne parametre, radi lakšeg viđenja, raspodjele snage.

Na slici 24. prikazan je istosmjerni izvor, koji se spaja na uzбудni namot sinkronog generatora.

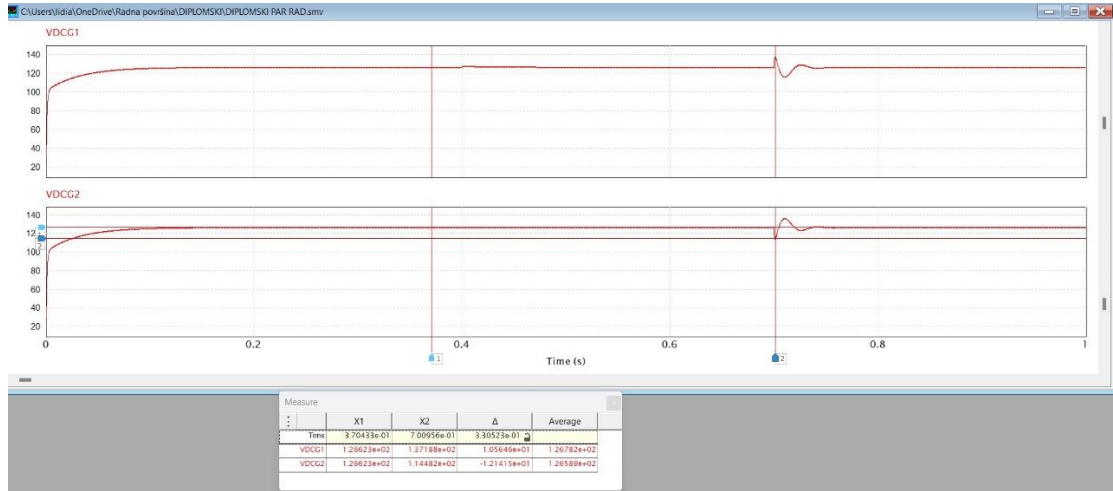


Slika 24. Istosmjerni izvor koji napaja uzбудni namot generatora. [8]

Sa slike 24. se vidi da je istosmjerni izvor napona, koji je spojen na uzбудni namot, iznosa napona 130[V], na kojeg je serijski spojen otpornik od 0,6 [Ω], koji služi kako bi se smanjio

napon. U ovom radu će se prikazati jednostavan izvor, radi lakšeg prikaza simulacije. Napon koji se mjeri na izlazu generatora, u ovom radu će biti linijski.

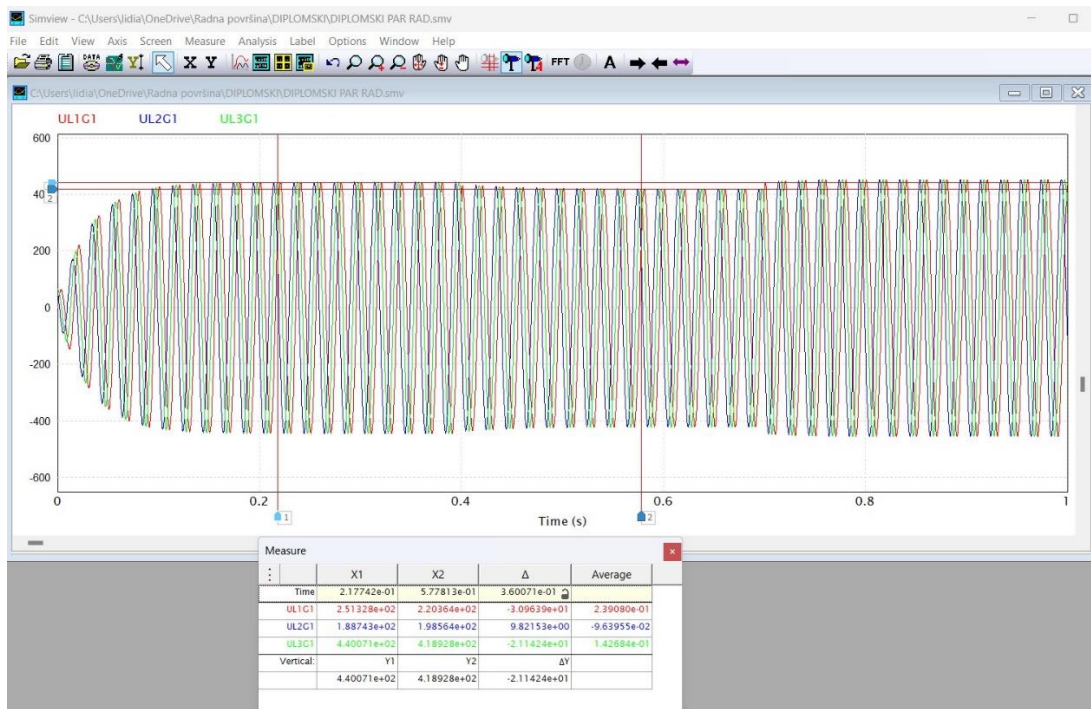
Na slici 25. prikazan je istosmjerni napon koji napaja rotor generatora 1 i generatora 2.



Slika 25. Istosmjerni napon koji napaja oba dizel generatora. [8]

Linijski napon, između dvije faze, koji se mjeri pomoću voltmetra, iznosi 440 [V]. Naponi, koji su na izlazu generatora, su fazno pomaknuti za 120 [°]. Naponi su istog iznosa na oba generatora. Nakon voltmetra koji se mjere napon, nalaze se ampermetri, koji mjere faznu struju koja teče kroz vodiče na izlazu iz generatora, koja se mjeri u amperima[A]. Na shemi se nalaze tri ampermetra, koji će mjeriti i prikazati promjene struja, prilikom simuliranja rada generatora.

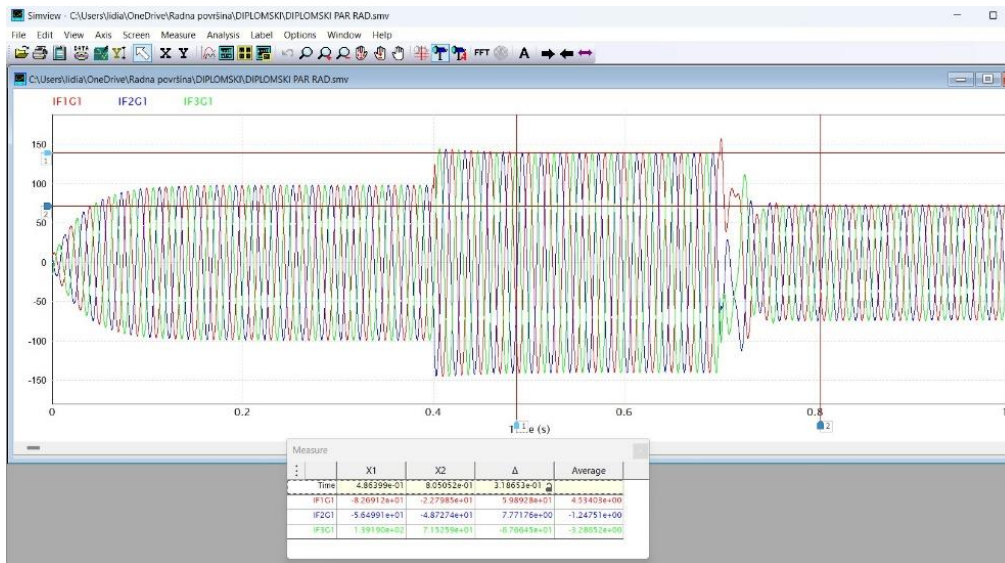
Na slici 26. prikazan je linijski napon na izlazu dizel generatora 1.



Slika 26. Linijski napon dizel generatora 1. [8]

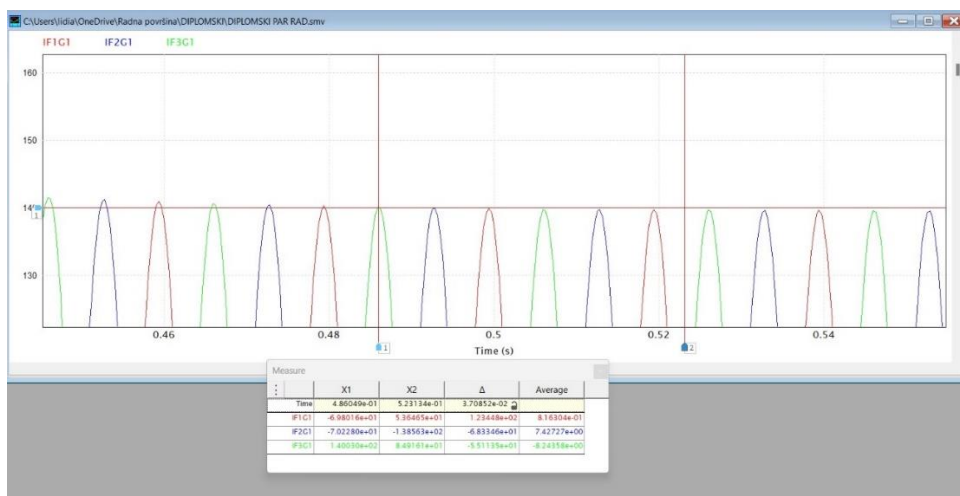
Sa slike 26. se može vidjeti da linijski napon dizel generatora 1 iznosi 440 [V]. Vrijednost napona od 440 [V] će biti do 0.4 [s] za vrijeme rada potrošača 1. Nakon uključanja potrošača 2 u 0.4 [s] dolazi do malog pada napona, koje traje do 0.7[s]. Nakon što se uključi dizel generator 2 u 0.7[s], povećava se ponovno linijski napon dizel generatora 1 na nazivnu vrijednost koju je imao prije nego se povećalo opterećenje sustava.

Na slici 27. prikazane su fazne vrijednosti struja dizel generatora 1, koje one predaje u elektroenergetski sustav.



Slika 27. Fazne vrijednosti struja dizel generatora 1. [8]

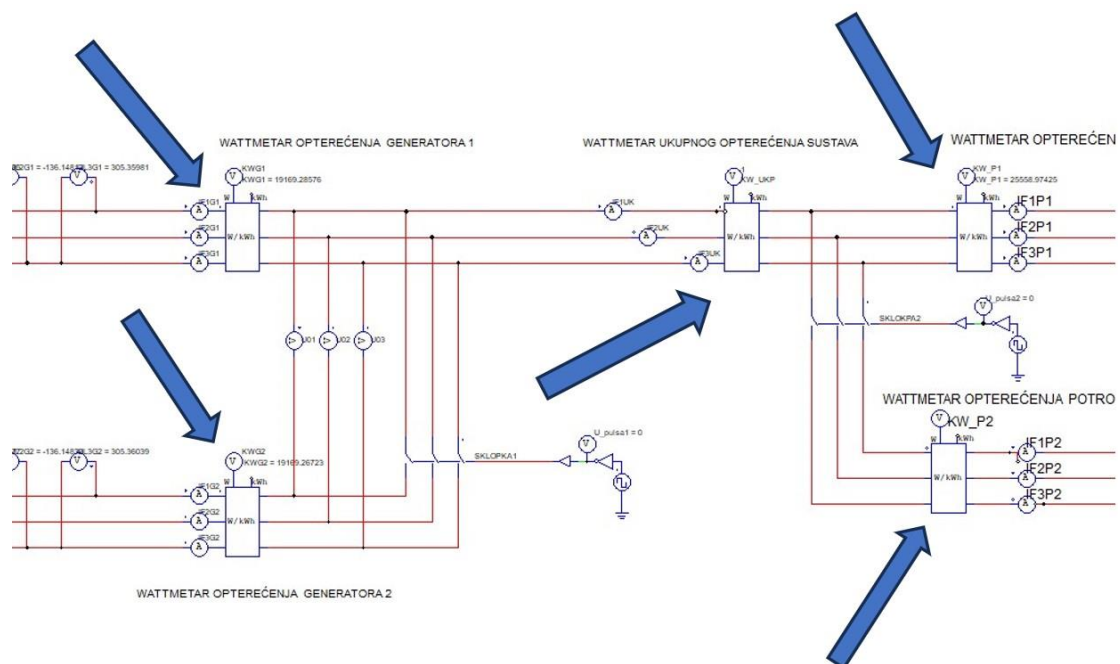
Sa slike 27. se vidi da su fazne struje, dizel generatora 1, iznose 100 [A], u periodu od 0 [s] do 0.4 [s]. Ova vrijednost struje je za vrijeme rada potrošača 1. U simulaciji u 0.4. [s] dolazi do uključivanja potrošača 2, pomoću prekidača koji je u ovoj simulaciji napravljen da je kontroliran pomoću istosmjernog napona i bidirekcijske sklopke, te se dizel generator 1 više optereti te se vrijednost struje poveća na 140 [A]. Na slici 28. prikazan je vrijednost struje dizel generatora 1 nakon uključjenja potrošača 2.



Slika 28. Detaljni prikaz struja dizel generatora 1. [8]

Ovako veća struja traje do vremena uključivanja dizel generatora 2, koji će preuzeti opterećenje. Dizel generator 2 se u ovoj simulaciji uključuje u 0.7 [s]. Sa slike 27. se vidi da nakon uključivanja dizel generatora 2 struja nakon 0.7 [s] smanji na 71 [A] te mu se smanji opterećenje i smanjuje opasnost od kvara. Kako bi se pratila potrošnja električne energije, u simulaciji će se postaviti trofazni Wattmetri koji mjere i grafički prikazuju promjene trenutne djelatne snage za vrijeme trajanja simulacije. U ovoj simulaciji će se prikazati 5 trofaznih wattmetara, koji će prikazati promjene snage potrošača 1 i promjenu snage potrošača 2 kada se uključi. Wattmetar ima još funkciju mjerenja potrošnje električne energije po satu (kWh), ali se to ne koristi jer je simulacija postavljena na trajanje od 1 [s] kako bi se lakše i kraće prikazale promjene opterećenja sustava.

Na slici 29. prikazani su wattmetri koji mjere djelatnu snagu brodskog elektroenergetskog sustava.



Slika 29. Wattmetri koji mjere djelatnu snagu brodskog sustava. [8]



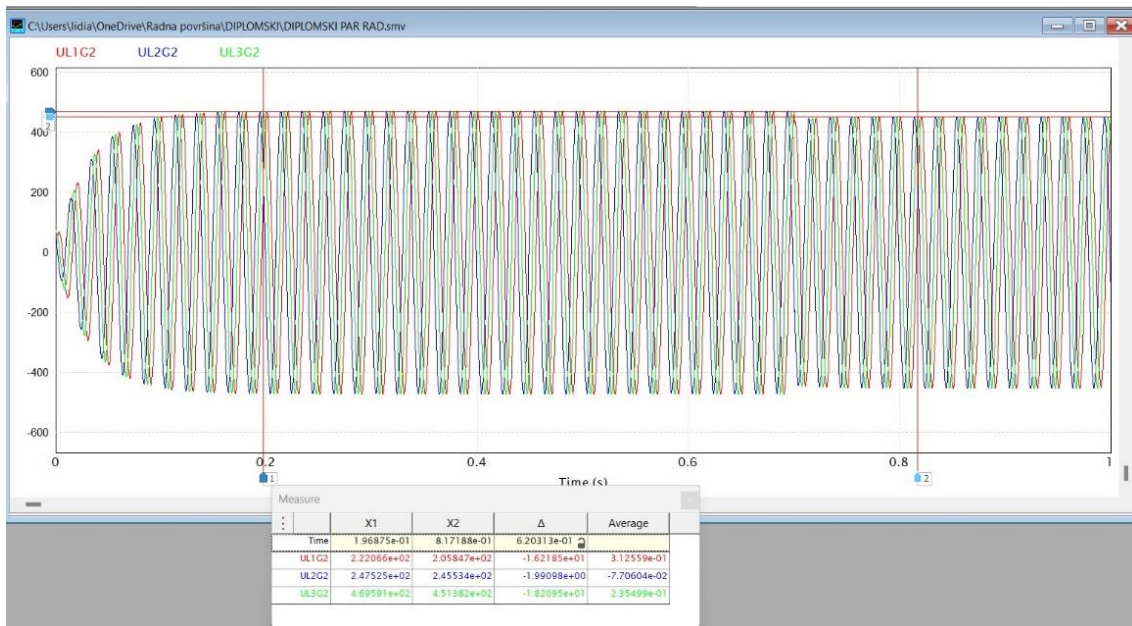
Na slici 30. prikazano je djelatno opterećenje dizel generatora 1.



Slika 30. Djelatno opterećenje dizel generatora 1. [8]

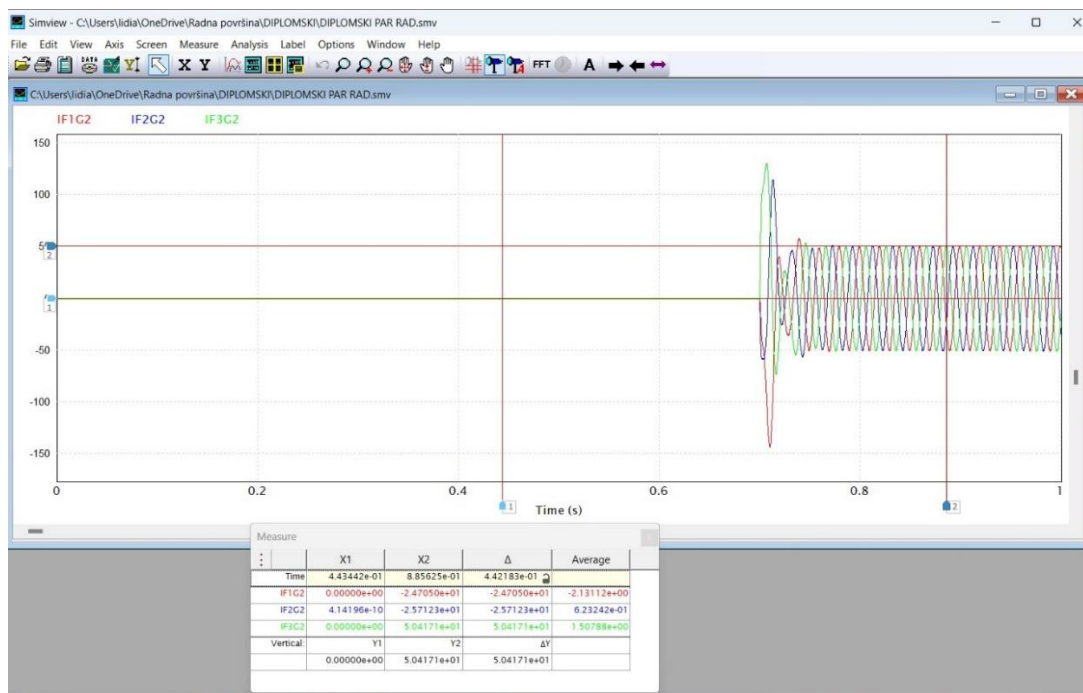
Sa slike 30. se vidi da je vrijednost opterećenja dizel generatora 1 u 0.2-oj [s] jednak 24,44 [kW], za vrijeme rada potrošača 1 te takvu vrijednost zadržava do 0.4 [s]. U 0.4-oj [s] dolazi do uključivanja potrošača 2 te se sa slike vidi kako vrijednost djelatne snage se povećava na 32,95 [kW]. U 0.7-oj [s] dolazi do uključivanja dizel generatora 2 te se vidi sa slike da nakon toga vremena dolazi do smanjena opterećenja na vrijednost od 18,6 [kW] te se cijeli sustav rastereti. dizel generator 2 će za vrijeme trajanja simulacije stvarati trofazni napon, ali ne dolazi do njegovog pada napona radi toga što nije uključen na brodsku mrežu. Napon koji stvara dizel generator 2 malo je veći od nazivne vrijednosti dizel generatora 1 radi toga što je potrebno povećati brzinu vrtnje rotora dizel generatora 2, kako bi se okretno polje dizel generatora 2 rotora brže vrtjelo od okretnog polja dizel generatora 1, kako bi se prilikom uključivanja dizel generatora 2 na brodsku mrežu, ne bi došlo da toga da dizel generator 2 ne prijeđe u motorski režim rada te dodatno optereti dizel generator 1.

Na slici 31. prikazana je linijska vrijednost napona dizel generatora 2, koju predaje na statorskim namotima.



Slika 31. Linijska vrijednost napona dizel generatora 2. [8]

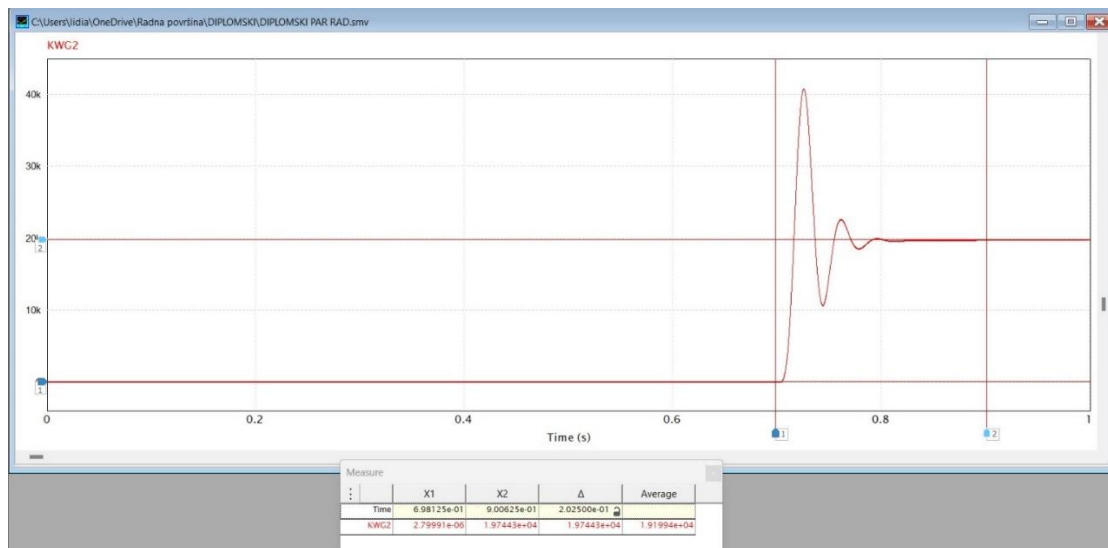
Na slici 32. prikazane su fazne struje dizel generatora 2.



Slika 32. Fazne struje dizel generatora 2. [8]

Sa slike 32. se vidi da vrijednost struje dizel generatora 2 u periodu od 0-te [s] do 0.7 [s] jednak 0 [A] radi toga što još nije uključen pomoću bidirekcijske sklopke koja je postavljena da se uključi pomoću naponskog impulsa u 0.7-oj [s]. Nakon sinkronizacije dizel generatora 2 s krutom mrežom te kada se ispune svi uvjeti, dolazi do uključanja sklopke. Sa slike 32. se vidi da kada se uključi sklopka u 0.7-oj [s] dolazi do naglog skoka struje koja traje vremenski par mili sekundi. Struja postiže konstantu vrijednost u 0.85-oj [s] te postiže vrijednost 50,41 [A].

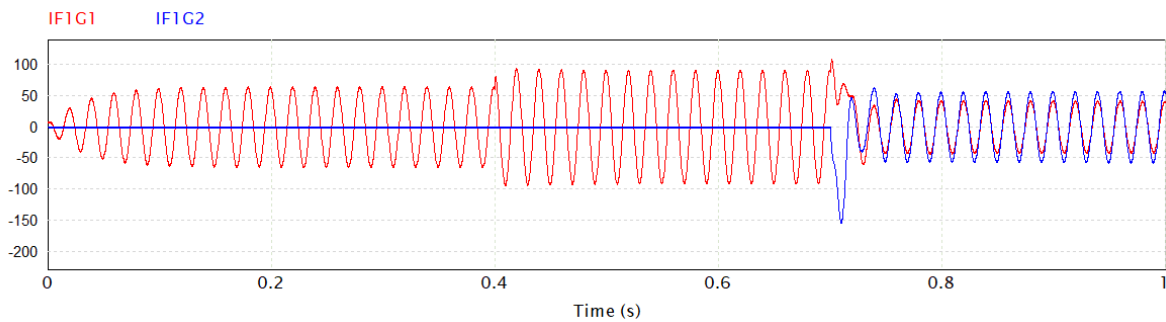
Na slici 33. prikazano je djelatno opterećenje dizel generatora 2.



Slika 33. Djelatno opterećenje dizel generatora 2. [8]

Sa slike 33. se vidi da je opterećenje dizel generatora 2 jednako nula do 0.7-me [s]. U 0.7-oj [s] dolazi do uključanja sklopke te dizel generator 2 preuzima vrijednost opterećenja koji stvaraju potrošač 1 i potrošač 2. Opterećenje se malo poveća te u 0.8-oj [s] postiže konstantnu vrijednost u iznosu od 19,7 [kW] te traje do kraja simulacije. Kako bi se usporedili struje dizel generatora 1 i dizel generatora 2 potrebno je grafički prikazati struje oba generatora.

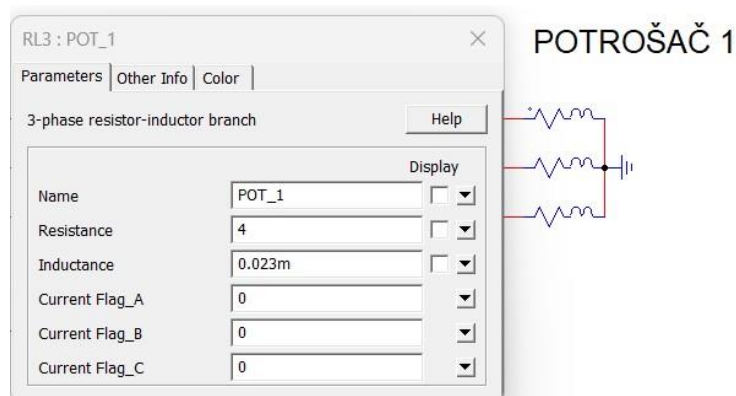
Na slici 34. prikazane su fazne vrijednosti struje dizel generatora 1 i dizel generatora 2.



Slika 34. Fazne struje dizel generatora 1 i dizel generatora 2.[8]

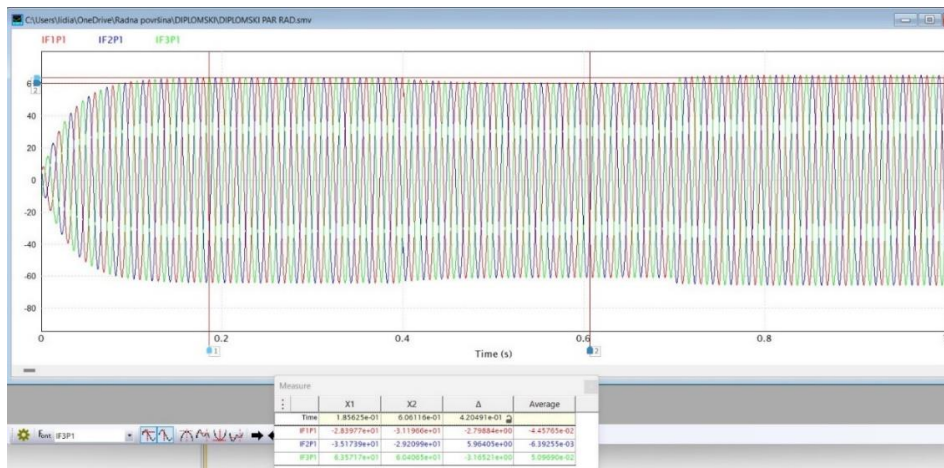
Sa slike 34. se vidi da vrijednost jedne faze struje dizel generatora 2 jednaka je nuli, dok se fazna vrijednost struje dizel generatora 1 povećava ovisno o uključivanju pojedinih potrošača pomoću sklopke. Potrošač 1 i potrošač 2 su trofazna radno induktivna trošila,koji u ovoj simulaciji predstavljaju opterećenje dizel generatora 1 i dizel generatora 2 prilikom njihovog rada i uključivanja u paralelni rad. potrošač 1 i potrošač 2 mogu se prikazati kao dva trofazna elektromotora koji imaju svoj djelatni otpor i induktivitet. Potrošač 1 će se prikazati u simulaciju kao radno-induktivno trošilo koje ima vrijednost djelatnog otpora 4 [ $\Omega$ ] i induktiviteta 0.23 [mH]

Na slici 35. prikazan je potrošač 1 koji se spojen na generatore.



Slika 35. Potrošač 1. [8]

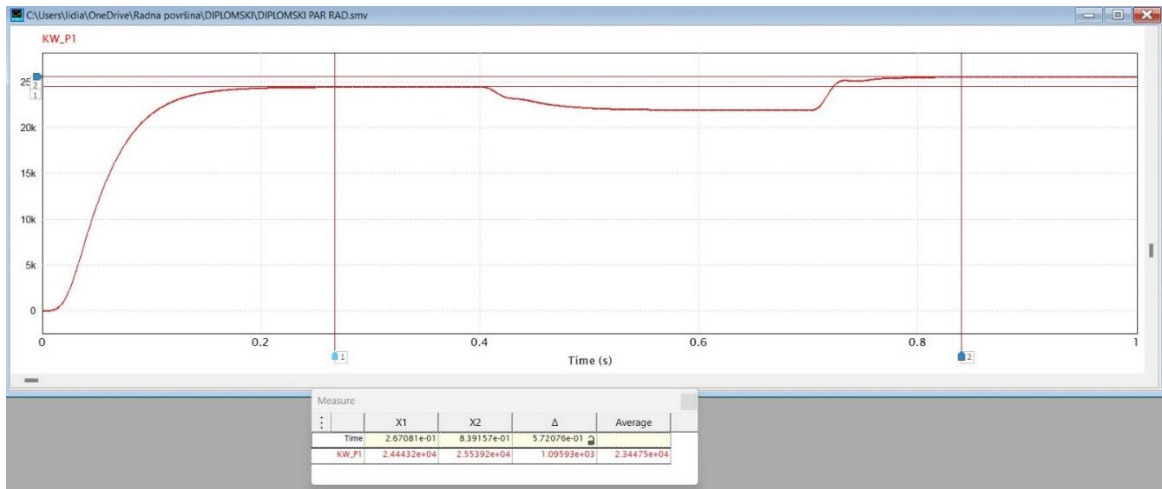
Potrošač 1 se može smatrati neki elektromotor koji ima ulogu za pokretanje nekog stroja na brodu, najčešće pomoćnih propulzora ili pumpi za hlađenje i cirkuliranje tekućina kroz brodski sustav. Potrošač 1 može raditi na nazivnom naponu generatora ili pomoću transformatora se prebaciti na neki veći naponski nivo, ovisno o potrebama brodskog elektroenergetskog sustava. U suvremenim brodovima najveći potrošači električne energije su elektromotori i električni uređaji za automatizaciju broda. Na slici 34. prikazane su fazne vrijednosti struja koje preuzima potrošač 1.



Slika 36. Vrijednost faznih struja koje uzima potrošač 1. [8]

Sa slike 36. se vidi da vrijednost struje potrošača 1 jednaka iznosu od 63,57 [A] te ima konstantnu vrijednost za vrijeme trajanja cijele simulacije. Djelatnu snagu koju uzima potrošač 1, postavljena je tako da je potrošač 1 uključen na dizel generator 1 od samog početka simulacije.

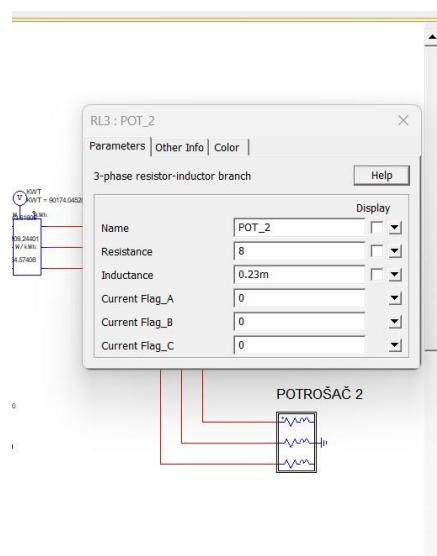
Na slici 37. prikazano je djelatno opterećenje koje uzima potrošač 1.



Slika 37. Djelatno opterećenje potrošača 1. [8]

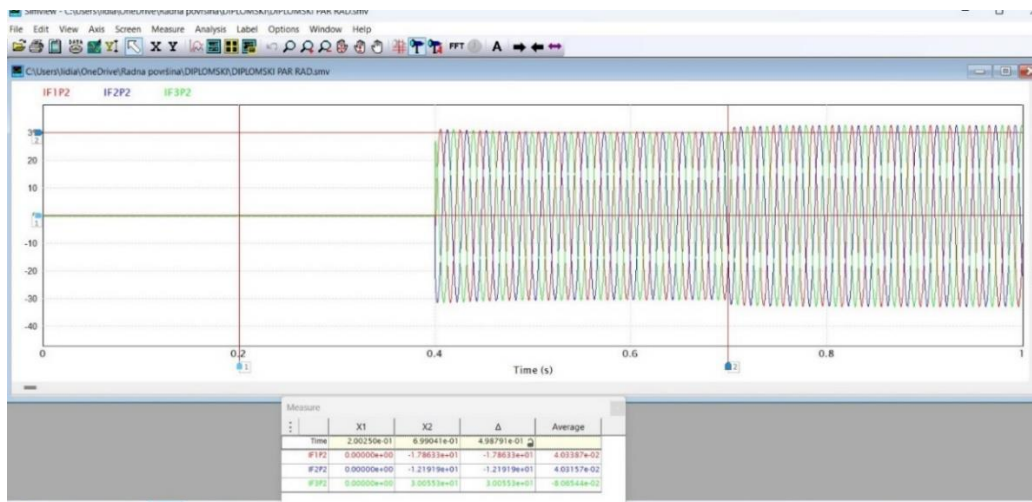
Sa slike 37. se vidi da potrošač 1 uzima u 0.2-oj [s] djelatno opterećenje iznosa 24,4 [kW] te se do kraja simulacije povećava na vrijednost od 25,5 [kW] te zadržava konstantu vrijednost. Potrošač 2 je stavljen u simulaciju kao radno-induktivno trošilo koje ima vrijednost djelatnog otpora 8 [ $\Omega$ ] i induktiviteta 0.23 [mH]. Potrošač 2 će se naknadno uključiti, kako bi se pratilo promjene struja i napona u sustavu.

Na slici 38. prikazani su električni parametri potrošača 2 koji se spojen na dizel generator.



Slika 38. Električni parametri potrošača 2. [8]

Na slici 39. prikazani su vrijednosti fazne struje koju uzima potrošač 2.



Slika 39. Vrijednost fazne struje potrošača 2. [8]

Sa slike 39. se vidi da potrošač 2 nije uključen na brodsku mrežu, jer iznos struje koju graf prikazuje je jednaka 0 [A], sve do 0.4-te [s]. Nakon 0.4-te [s] se uključuje sklopka te nakon toga struja raste do vrijednosti 31.22 [A] te takvu vrijednost zadržava do kraja trajanja simulacije. Na slici 40. prikazane su vrijednosti djelatnog opterećenja koju stvara potrošač 2.

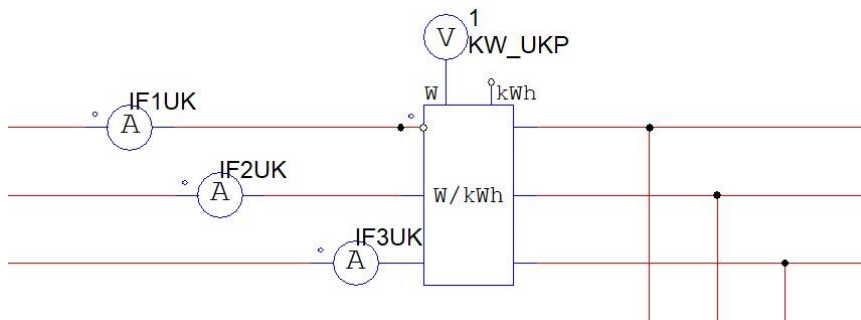


Slika 40. Djelatno opterećenje potrošača 2. [8]

Sa slike 40. se vidi da potrošač 2 uzima iz brodske mreže od 0-te [s] do 0.4-te [s] djelatnu snagu iznosa 0 [kW]. Nakon što se potrebe broskog sustava povećaju za električnim potrošačem, dolazi do uklapanja prekidača, u ovom slučaju sklopke, te se u 0.4-oj [s], djelatna snaga se

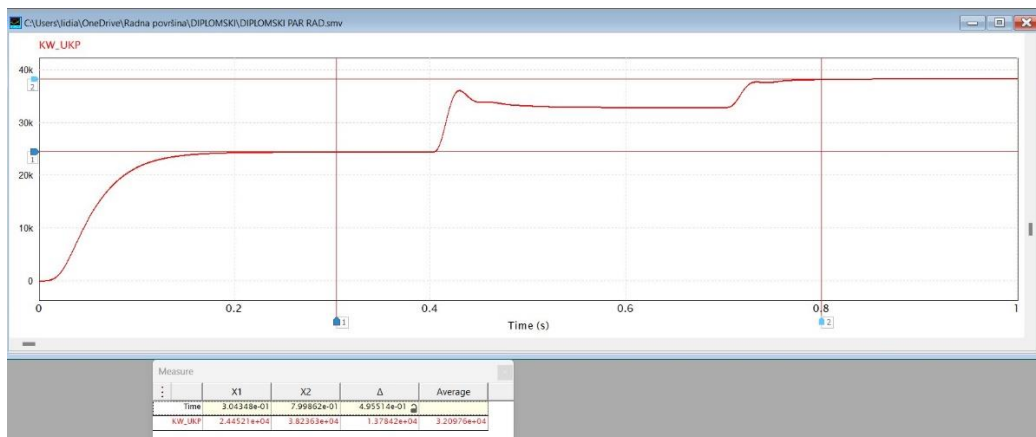
poveća na 11,03 [kW]. Cijelo mjerenje opterećenja mjereno je središnjim wattmetrom koji ima ulogu praćenja i usklađivanja djelovanja električne energije. Središnji wattmetar mjeri snagu koju predaju generator 1 i generator 2, te ukupnu struju koja prolazi sustavom. Prije wattmetra se nalaze tri ampermetra koji mjere struju koja prolazi kroz cijeli brodski sustav. Na slici 41. prikazan je glavni wattmetar koji mjeri snagu cjelog broskog sustava.

### WATTMETAR UKUPNOG OPTEREĆENJA SUSTAVA



Slika 41. Glavni Wattmetar. [8]

Na slici 42. prikazano je ukupno djelatno opterećenje dizel generatora 1 i 2.

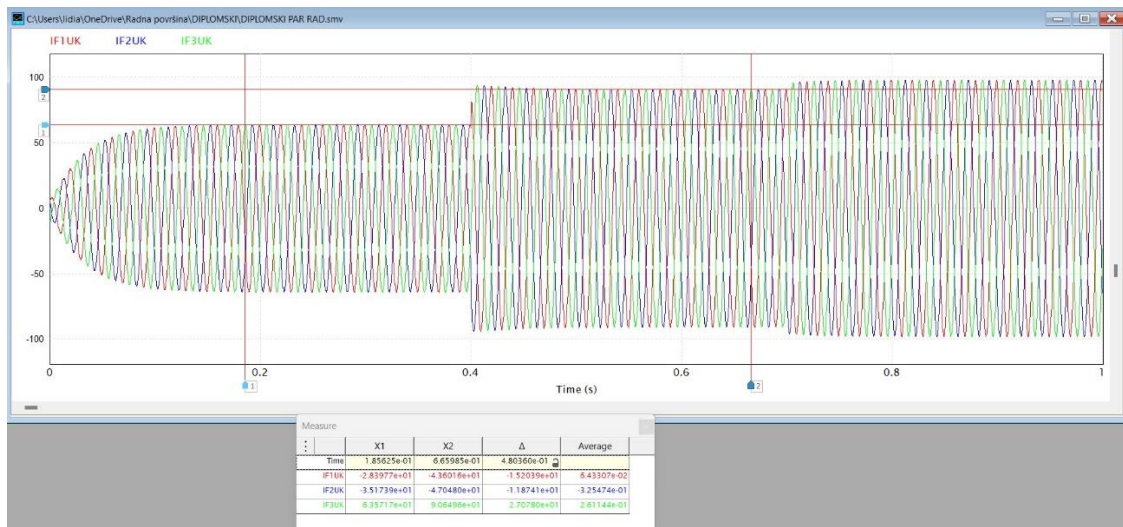


Slika 42. Djelatno opterećenje koje predaju dizel generatori 1 i 2. [8]

Sa slike 42. se vidi da je snaga koju dizel generatori predaju potrošaču 1 iznosa 24,44[kw], za vrijeme rada samo potrošača 1. U 0.4-oj [s] dolazi do uključenja potrošača 2 te se djelatna snaga poveća na 38,2 [kW] te traje do kraja trajanja simulacije. potrošač 1 i potrošač 2



predstavljaju ukupno opterećenje sustava u simulaciji. Na slici 43. prikazana je ukupna fazna struja koja prolazi kroz brodski sustav.



Slika 43. Ukupna struja koja prolazi kroz brodski sustav. [8]

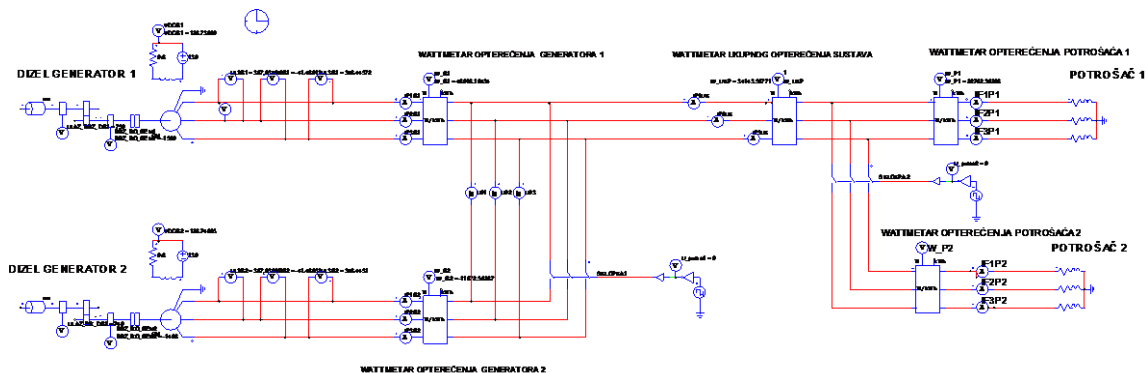
Sa slike 43. se vidi da struja lagano raste do 0.1-ne [s] te iznosi 63.57 [A] te traje do 0.4-te [s]. Nakon 0.4-te [s], nakon uključjenja potrošača 2, dolazi do povećanja struje na iznos 90.64 [A]

## 6.1. Slučaj rada generatora u motorskom režimu rada

Za slučaj da se dizel generator 2 prilikom uključjenja ne postigne brzinu vrtnje veću od brzine vrtnje dizel generatora 1, dolazi do toga da dizel generator 2 prijeđe u motorski režim rada te dodatno optereti sustav.

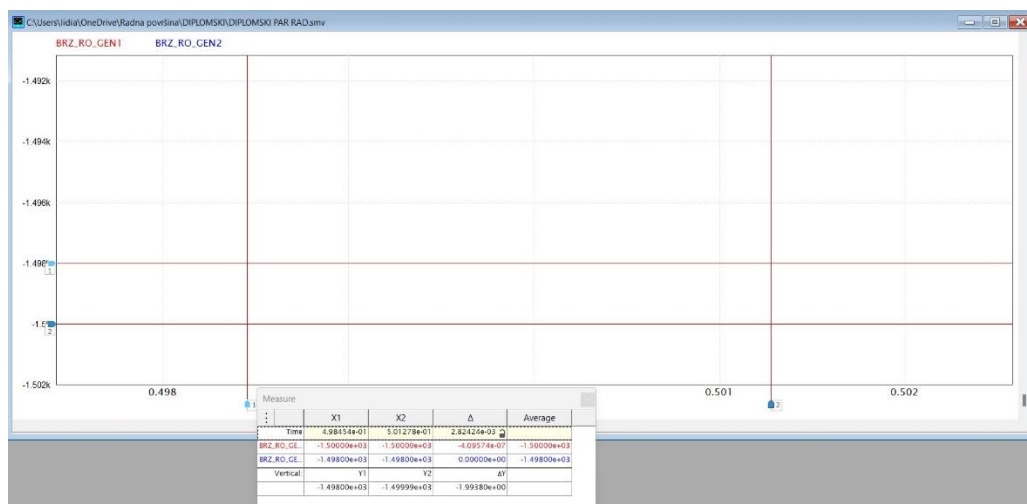
Ovaj slučaj se događa prilikom veće frekvencije brodskog sustava u odnosu na frekvenciju dizel generatora 2, koji se uključuje na paralelni rad na brodsku mrežu. Simulacija je u potpunosti ista, s tim da se brzina dizel generatora 2 smanji na 1498[o/min], te da se postigne motorski režim rada dizel generatora 2. Prikaz simulacije je u potpunosti isti kao za predhodnom slučaju.

Na slici 44. prikazana je simulaciju za vrijeme rada dizel generatora 2 u motornom režimu rada.



Slika 44. Simulacija za vrijeme motorskog rada dizel generatora 2. [8]

Na slici 45. prikazana je brzina vrtnje dizel generatora 2, koja je u ovoj simulaciji konstantna.



Slika 45. Brzina vrtnje dizel generatora 2. [8]

Sa slike 45. se vidi da brzina rotora dizel generatora 1 iznosi 1500 [o/min] te ima konstantnu vrijednost. Brzina rotora dizel generatora 2 iznosi 1498 [o/min]. U ovom slučaju doći će do toga se polje rotora dizel generatora 1 sporije vrte u odnosu na okretno polje brodske mreže, te nakon uključivanja sklopke, dolazi do motorskog režima rada dizel generatora 2. Snagu koju je trebao predati dizel generator 2 brodskom sustavu, nakon uključivanja sklopke, dolazi do toga da cijelo opterećenje preuzme dizel generator 1.

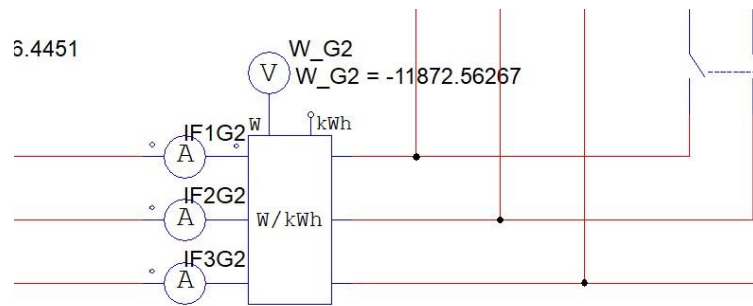
Na slici 46. prikazano je djelatno opterećenje dizel generatora 1 u slučaju rada dizel generatora 2 u motorskom režimu rada.



Slika 46. Djelatno opterećenje dizel generatora 1 u slučaju rada dizel generatora 2 u motorskom režimu rada. [8]

Sa slike 46. se vidi da opterećenje broskog sustava raste kao u slučaju paralelnog rada generatora. Jedina razlika je to da nakon 0.7 [s] u slučaju da je brzina vrtnje rotora dizel generatora 2 veća od brzine vrtnje rotora dizel generatora 1, dolazi do smanjenja opterećenja koje se svodi na dizel generator 1. U ovom slučaju, kada je brzina vrtnje rotora dizel generatora 2, manja negoli brzina vrtnje rotora dizel generatora 1, opterećenje će raste radi toga što dizel generator 1 preuzima opterećenje koje stvara dizel generator 2 u motorskom režimu rada.

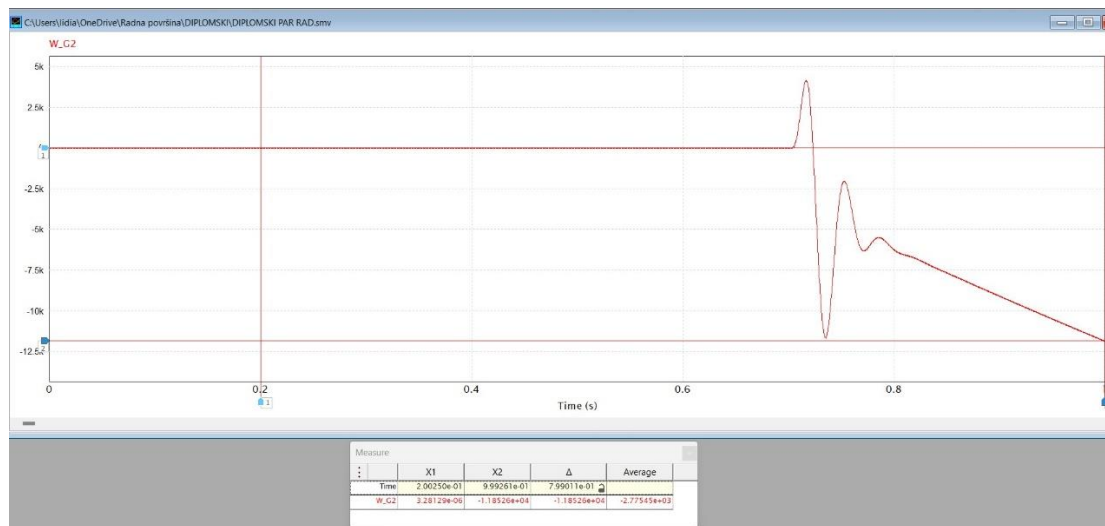
Na slici 47. prikazano je djelatno opterećenje koje uzima dizel generator 2 prilikom rada u motorskom režimu rada.



### WATTMETAR OPTEREĆENJA GENERATORA 2

Slika 47. Djelatno opterećenje dizel generatora 2. [8]

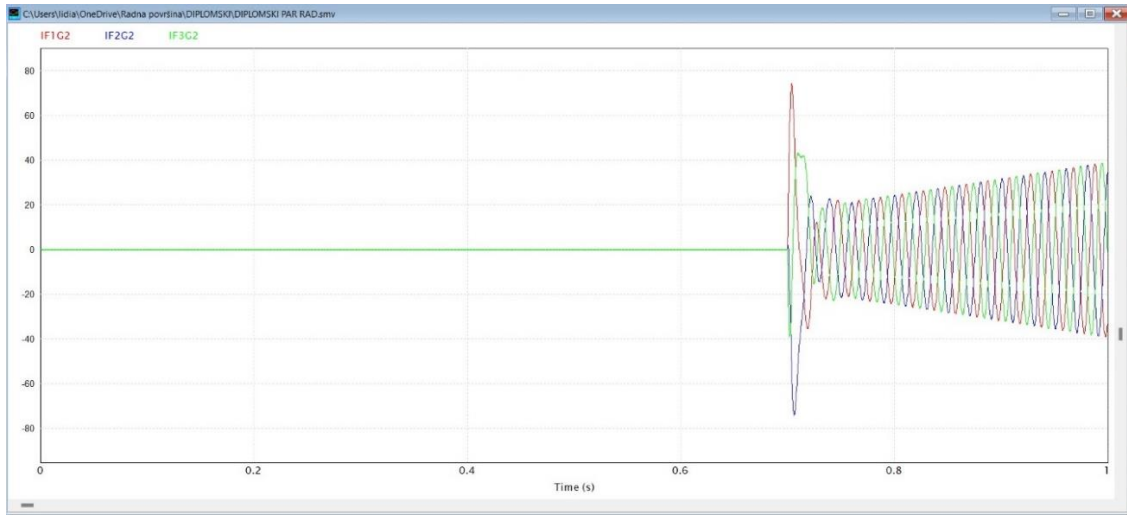
Sa slike 47. se vidi da ikona wattmetra koja mjeri snagu dizel generatora 2 je iznosi -11,88 [kW]. To što je negativnog iznosi, samo govori da električna energija ide u smjeru od mreže brodske mreže prema dizel generatoru 2. Na slici 48. prikazano je djelatno opterećenje dizel generatora 2.



Slika 48 Grafički prikaz djelatnog opterećenja dizel generatora 2. [8]

Sa slike 48. se vidi da opterećenje sustava jednako je 0 [W] do 0.7 [s]. Nakon uključjenja dizel generatora 2 sa brzinom vrtnje rotora 1498 [o/min], dolazi do toga da generator sa opterećenjem ide u negativnu vrijednost što znači da počinje raditi u motorskom režimu rada.

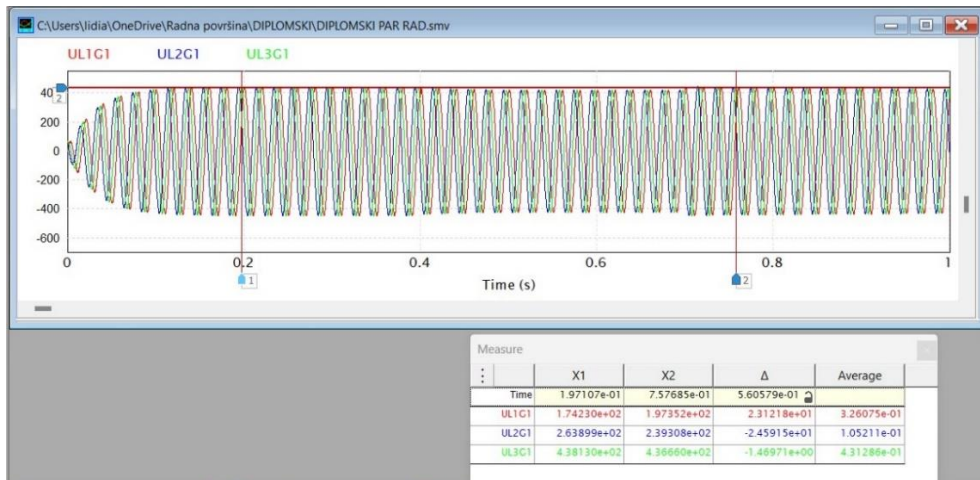
Na slici 49. prikazane su fazne struje dizel generatora 2 u motroskom režimu rada.



Slika 49. Fazne struje dizel generatora 2. [8]

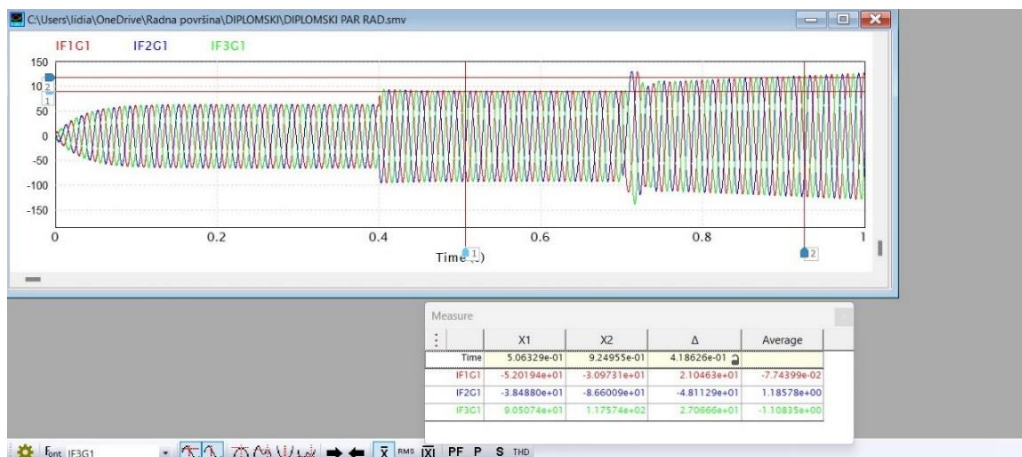
Sa slike 49. se vidi da je struja koju dizel generator 2 uzima od sustava jednaka je 0 [A] do 0.7 [s]. U 0.7-oj [s] dolazi do uključjenja sklopke koja je kontrolirana pomoću naponskog izvora. Nakon 0.7 [s] dolazi do linearnog povećanja struje do vrijednosti 40 [A]. Prilikom rada dizel generatora 2, moguće je očekivati da će vrijednost napona dizel generatora 1 pasti nakon uključjenja dizel generatora 2.

Na slici 50. prikazane su vrijednost napona dizel generatora 1.



Slika 50. Vrijednost napona dizel generatora 1. [8]

Sa slike 50. se vidi da linijska vrijednost napona dizel generatora 1 iznosi približno 438 [V] što je približno nazivnima vrijednostima generatora. Nakon uključenja sklopke, u 0.7-oj [s] se vidi kako dođe do pada napona na dizel generatoru 2.



Slika 51. Fazne struje dizel generatora 1. [8]

Sa slike 51. se vidi da vrijednost fazne struje iznosi 95,5 [A] te nakon uključenja dizel generatora 2 u motorskom režimu rada dolazi do povećanja struje na vrijednost struje od 117,5 [A]. Radi toga što se u simulaciji nalaze dva generatora, ampermetri koji mjere struju, koju predaje dizel generator 1, wattmetar koji je mjeri, predstavlja glavni wattmetar u ovom slučaju.

## ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazan je rad brodskog elektroenergetskog sustava. Generatori su iznimno važni za rad brodske električne centrale, budući da opskrbljuju električnom energijom sve električne uređaje na brodu. Svaki prekid napajanja može biti koban u teškim okolnostima. Dizel generator jedan je od najkritičnijih sustava za rad broda.

Dizel generatori rade u standardiziranom dijeljenju opterećenja, paralelnom načinu rada. Kada se potražnja za snagom poveća, sustav će pokrenuti dodatni dizel generator. Kada se potražnja za snagom smanji, sustav će zaustaviti dizel generator koji je zadnji pokrenut za pomoć u brodskom elektroenergetskom sustavu.

Simulacija elektroenergetskog sustava u programskom paketu ima važnu ulogu u projektiranju i dimenzioniranju energetske elektronike. Simulacijom se prate promjene u sustavu te simulacijski model pomaže u dimenzioniranju sklopne ploče, njenih dijelova (osigurači, rastavljači, sklopke, sabirnica, sklopnici, prekidači) kao i ostalih elektroenergetskih dijelova električne mreže.

Postoje različiti programski paketi pomoću kojih se sastavljaju i pokreću simulacije. U POWER SIMULATORU (PSIM programu) je prikazana simulacija rada dva dizel generatora u paralelnom radu, grafički se prikazalo promjene vrijednosti napona, povećanja i smanjenja struja koje prolaze kroz elektroenergetski sustav broda te promjena opterećenja koje stvaraju potrošači.

U današnje vrijeme, dolazi do povećanja električnih potrošača na brodovima te je potrebno osigurati da cijeli sustav funkcionira bez prekida opskrbe električnom energijom.

## LITERATURA

- [1] Štajdohar, M. (2023). Automatizacija brodskih glavnih dizel generatora, Pomorski fakultet u Splitu, Split.
- [2] Krčum, M.: Električni strojevi I, skripta, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije, Split, 2009.
- [3] Vučetić, D., materijali preuzeti iz kolegija „Brodski električni sustavi“, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka.
- [4] Mandić, I.; Tomljenović, V.; Pužar, M.: Električni strojevi II, Tehničko veleučilište u Zagrebu, Zagreb, 2012.
- [5] Varvodić, K.: Regulacija napona sinkronog generatora pomoću frekvencijskog pretvarača, završni rad, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije, Split, 2022.
- [6] <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/13/5125>
- [7] <https://powersimtech.com/>- PDF
- [8] PSIM program



## POPIS SLIKA

Slika 1. Sinkroni stroj.[5] .....	3
Slika 2. Stator i elementarni namot sinkronog stroja. [2].....	4
Slika 3. Način rada sinkronog stroja u generatorskom i motorskom režimu rada. [2].....	5
Slika 4. Dizel generator. [3] .....	6
Slika 5. Dinamički sustav uzbude [2].....	7
Slika 6. Statička uzbuda sinkronog stroja [4].....	8
Slika 7. Beskontaktna uzbuda sinkronog generatora. [2].....	9
Slika 8. Naponske vrijednosti generatora i krute mreže.....	11
Slika 9. Kontrola ploča. [3] .....	12
Slika 10. Shema spajanja lampi za provjeru istofaznosti napona. [3].....	13
Slika 11. Fazne vrijednosti napona dizel generatora. ....	14
Slika 12. Fazni dijagram.....	14
Slika 13. Blok shema dva dizel generatora. [4].....	16
Slika 14. Shema ovisnosti frekvencije o djelatnoj snazi. [3] .....	16
Slika 15. Izbornik alata u PSIM programu. [7] .....	17
Slika 16. Izbornik elemenata u PSIM programu. [7] .....	18
Slika 17. Shema u PSIM programu i početak pokretanja simulacije. [7] .....	19
Slika 18. Primjer odabira veličina i pregleda rezultata. [7].....	19
Slika 19. Shema simulacije.[8].....	20
Slika 20. Mehanički izvor. [8].....	21
Slika 21. Brzina vrtnje mehaničkog izvora. [8].....	22
Slika 22. Prijenosnik snage(multiplikator). [8] .....	23
Slika 23. Električni parametri dizel generatora. [8] .....	24
Slika 24. Istosmjerni izvor koji napaja uzбудni namot generatora. [8] .....	24
Slika 25. Istosmjerni napon koji napaja oba dizel generatora. [8] .....	25
Slika 26. Linijski napon dizel generatora 1. [8] .....	26
Slika 27. Fazne vrijednosti struja dizel generatora 1. [8].....	27
Slika 28. Detaljni prikaz struja dizel generatora 1. [8].....	27
Slika 29. Wattmetri koji mjere djelatnu snagu brodskog sustava. [8] .....	28
Slika 30. Djelatno opterećenje dizel generatora 1. [8] .....	29
Slika 31. Linijska vrijednost napona dizel generatora 2. [8].....	30

Slika 32. Fazne struje dizel generatora 2. [8] .....	30
Slika 33. Djelatno opterećenje dizel generatora 2. [8] .....	31
Slika 34. Fazne struje dizel generatora 1 i dizel generatora 2.[8] .....	32
Slika 35. Potrošač 1. [8] .....	32
Slika 36. Vrijednost faznih struja koje uzima potrošač 1. [8] .....	33
Slika 37. Djelatno opterećenje potrošača 1. [8] .....	34
Slika 38. Električni parametri potrošača 2. [8].....	34
Slika 39. Vrijednost fazne struje potrošača 2. [8] .....	35
Slika 40. Djelatno opterećenje potrošača 2. [8] .....	35
Slika 41. Glavni Wattmetar. [8] .....	36
Slika 42.Djelatno opterećenje koje predaju dizel generatori 1 i 2. [8].....	36
Slika 43. Ukupna struja koja prolazi kroz brodski sustav. [8] .....	37
Slika 44. Simulacija za vrijeme motorskog rada dizel generatora 2. [8].....	38
Slika 45. Brzina vrtnje dizel generatora 2. [8] .....	38
Slika 46. Djelatno opterećenje dizel generatora 1 u slučaju rada dizel generatora 2 u motorskom režimu rada. [8] .....	39
Slika 47. Djelatno opterećenje dizel generatora 2. [8] .....	40
Slika 48 Grafički prikaz djelatnog opterećenja dizel generatora 2. [8].....	40
Slika 49. Fazne struje dizel generatora 2. [8] .....	41
Slika 50.Vrijednost napona dizel generatora 1. [8].....	42
Slika 51. Fazne struje dizel generatora 1. [8] .....	42