

# Mogućnosti implementacije varijabilnih frekvencijskih transformatora u realni EES

---

Vuzem, Denis

Master's thesis / Diplomski rad

2023

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:835936>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-17**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**Mogućnosti implementacije varijabilnih frekvencijskih  
transformatora u realni EES**

**Diplomski rad**

**Denis Vuzem**

**Osijek, 2023.**

# SADRŽAJ

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Uvod.....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2. Razvoj električne mreže i međusobno povezivanje.....</b>  | <b>2</b>  |
| <b>3. Varijabilni frekvencijski transformator (VFT).....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>3.1. Koncept i struktura VFT.....</b>  | <b>6</b>  |
| 3.1.1. VFT koncept.....   | 7         |
| 3.1.2. Struktura i shema VFT .....  | 8         |
| 3.1.3. Dijelovi VFT .....   | 9         |
| <b>3.2. Osnovne funkcije VFT.....</b>   | <b>11</b> |
| 3.2.1. Asinkrono povezivanje .....  | 11        |
| 3.2.2. Kontrola prijenosa snage i frekvencije .....   | 12        |
| 3.2.3. Napajanje slabih sustava i ostale funkcije VFT-a.....  | 13        |
| <b>3.3. Upravljanje VFT.....</b>  | <b>14</b> |
| <b>3.4. Primjena VFT u velikim elektroenergetskim sustavima.....</b>  | <b>15</b> |
| 3.4.1. Mreže ultra visokog napona (UHV grid) i tehnologija čiste energije.....  | 17        |
| 3.4.2. Usporedba HVDC i VFT tehnologije za asinkrono povezivanje.....   | 18        |
| 3.4.3. Korištenje VFT za smanjenje niskofrekventnih oscilacija sustava i poboljšanje karakteristika nestabilnog napajanja ..... | 19        |
| 3.4.4. Ostali načini korištenja VFT.....  | 20        |
| <b>4. Upravljanje i kontrola sustavom i elementima VFT.....</b>   | <b>22</b> |
| <b>4.1. Upravljanje VFT na razini sustava .....</b>   | <b>23</b> |
| <b>4.2. Predviđene strategije u hijerarhijskoj kontroli na razini elemenata VFT .....</b>                                       | <b>24</b> |
| 4.2.1. Stupnjevi u hijerarhijskoj kontroli i kontrola greške pomoću SDBR .....  | 24        |
| <b>4.3. Elementi i osnovne jednadžbe istosmjernog pogonskog sustava VFT .....</b>   | <b>27</b> |
| <b>4.4. Koncept upravljanja VFT na razini uređaja.....</b>  | <b>30</b> |
| <b>5. ANALIZA POGONSKIH I EKONOMSKIH KARAKTERISTIKA .....</b>   | <b>33</b> |
| <b>5.1. Pogonske karakteristike .....</b>   | <b>33</b> |
| <b>5.2. Ekonomske karakteristike VFT .....</b>  | <b>35</b> |
| <b>5.3. Usporedba troškova VFT i HVDC tehnologije .....</b>   | <b>36</b> |
| <b>6. Model Varijabilnog frekvencijskog transformatora u <i>DigSilent</i> programu.....</b>                                     | <b>39</b> |
| <b>6.1. Povezivanje dva IEEE 14-sabirnička sustava preko VFT.....</b>   | <b>40</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| 6.1.1. Analiza tokova snaga.....              | 42        |
| 6.1.2. Promjena opterećenja .....             | 48        |
| 6.1.3. Ekonomska analiza smanjenja snage..... | 55        |
| <b>7. ZAKLJUČAK.....</b>                      | <b>57</b> |
| <b>8. LITERATURA .....</b>                    | <b>58</b> |
| <b>SAŽETAK.....</b>                           | <b>61</b> |
| <b>ABSTRACT .....</b>                         | <b>61</b> |
| <b>ŽIVOTOPIS.....</b>                         | <b>62</b> |
| <b>PRILOZI:.....</b>                          | <b>63</b> |

## 1. Uvod

Moderni elektroenergetski sustavi projektirani su kako bi u svakom trenutku s velikom pouzdanošću učinkovito napajali potrošače električnom energijom. Porast broja uređaja, raste i potreba za električnom energijom, sve ti dovodi do bolje kvaliteta života. Kako bi svaki potrošač imao stalnu mogućnost pouzdane, kvalitetne i u konačnici sigurne električne energije, elektroenergetski sustav, odnosno prijenos i distribucija, moraju biti sposobni isporučiti električnu energiju, [32]. Zbog ekonomskih, okolišnih ili sigurnosnih razloga elektrane se obično grade na udaljenim mjestima. Kako bi prijenos električne energije bio sigurniji i pouzdaniji sustavi se povezuju u veće sustave. Upravo zbog toga postoji i nedostatak u međusobnom povezivanju sustava, započne li poremećaj u jednom sustavu, isti poremećaj će se proširiti po čitavom sustavu. U svakom trenutku operator prijenosnog sustava mora voditi brigu o raznim parametrima u mreži, kao što su napon i frekvencija. Na strani potrošača napon i frekvencija su vrlo bitni, tu je vrlo bitno da su stalnog i ne promijenjenog iznosa. Iznos napona i frekvencije nam govori o stanju sustava, sustav može biti preopterećen i podopterećen. Proizvodnja i potrošnja djelatne i jalove snage je rezultat stanja sustava. U novije vrijeme sve se više pojavljuju ovakvi problemi, i potakli su razvoj tehnologije kao što je varijabilni frekvencijski transformator. U ovom diplomskom radu opisan je varijabilni frekvencijski transformator i mogućnosti implementacije u realni elektroenergetski sustav. U zadnjem poglavlju se simulira sustav u kojem je modeliran VFT sustav. Na modelu je provedena analiza tokova snaga, kroz analizu tokova snage prikazani su gubici snage u VFT sustavu.

## 2. Razvoj električne mreže i međusobno povezivanje

Električna mreža je važna infrastruktura potrebna za razvoj ekonomije i prijenos električne energije, te je važna platforma za optimalnu raspodjelu energetske resursa. Konkretno, s ubrzanom razvojem čiste energije te promicanjem i primjenom tehnologije pametnih mreža, funkcija energetskih mreža postaje sve istaknutija. U povijesnom razvoju planiranja, izgradnje, vođenja i korištenja pogona elektroenergetskih sustava, te težnja za konstantnom opskrbom potrošača električnom energijom neophodno je bilo izgraditi elektrane, kao i prikladnu prijenosnu i distribucijsku elektroenergetsku mrežu, [32]. Navedeni procesi razvoja elektroenergetskih mreža rezultirali su međusobnim povezivanjem elektroenergetskih sustava u interkonekcijske sustave. Međusobno povezivanje elektroenergetskih mreža u različitim regijama također je neophodno sredstvo za razvoj elektroenergetske mreže u velikim razmjerima. U povećanju međusobnog povezivanja snage mreže, potrebno je odabrati prikladne načine međusobnog povezivanja na temelju stvarnog stanja energetskih mreža kako bi se osigurao siguran rad međusobno povezanih energetskih mreža. Osim međusobnog povezivanja, potrebno je postići fleksibilnu kontrolu velikih elektroenergetskih mreža i njihovu sposobnost za optimiziranjem raspodjele tokova snaga. Osim tehničkih razloga, postoji i ekonomska dobit u povećanju pouzdanosti i raspoloživosti povezanih elektroenergetskih sustava. Takva način povezivanja prešao je nacionalne granice početkom 20. stoljeća u Sjevernoj Americi i u Europi 30-ih godina prošlog stoljeća. Početkom 21. stoljeća međunarodno međusobno povezivanje se i dalje širi s perspektivom da obuhvati sve kontinente, kao što postoji primjer s međusobnim povezivanjem u Sjevernoj Americi. U Sjevernoj Americi postoje Zapadna, Istočna i interkonekcija Teksasa, uz tri Kanadske sub-interkonekcije. U Europi se razvija Zapadnoeuropska interkonekcija (UCPTE), centralno europska interkonekcija (CENTREL) i međusobno povezivanje nordijskih zemalja (NORDEL). Osim navedenih interkonekcija postoje još neke kao što su u Velikoj Britaniji i zajednici Nezavisnih zemalja (bivši SSSR, gdje se razvijaju povezani elektroenergetski sustav - IPS i jedinstveni elektroenergetski sustav - UPS), Centralnoj Americi, Africi i Aziji, [19].

Međusobno povezivanje neovisnih elektroenergetskih sustava može se ostvariti sinkrono i asinkrono. Sinkrono povezivanje realizira se povezivanjem elektroenergetskih sustava, sustavi rade na istoj nazivnoj frekvenciji. Suprotno tome, asinkrono povezivanje omogućuje međusobno povezivanje sustava koji rade na različitim frekvencijama, neovisno o različitim frekvencijama različitih sustava. Asinkrono povezivanje se obično realizira preko istosmjernih vodova visokog napona (HVDC), u tom slučaju sustavi koji se povezuju rade na različitim frekvencijama. Ovakvi primjeri povezivanja se javljaju u Kini, Japanu, Meksiku i Brazilu. Drugi način korištenja asinkronog povezivanja je

povezivanje je otoka s kopnom, gdje su istosmjerni vodovi isplativiji od trofaznog voda (takav primjer povezivanja je povezivanje Francuske i Velike Britanije podmorskim kablom istosmjerne struje). Stoga je Kina napravila veliki razvoj i implementaciju prijenosa ultra visokog napona (UHV) za AC 1000 kV, DC  $\pm$  800 kV i DC  $\pm$  1100 kV. Fokusirajući se na izgradnju pametnih UHV mreža. Mreže ove vrste formirati će novi koncept u razvoju elektroenergetskih mreža i u povezivanju velikih elektroenergetskih mreža. Konačno, uz dugotrajna istraživanja na temelju razvoja elektroenergetskih sustava, United States General Electric Company (GE) predložio je uređaj za međusobno povezivanje koji se razlikuje od istosmjernog asinkronog i izmjeničnog sinkronog, ovaj uređaj koristi visokofrekventni indukcijski motor kao jezgru varijabilnog frekvencijskog transformatora. Kao novi uređaj za međusobno povezivanje električne mreže, varijabilni frekvencijski transformator (VFT) igrati će veliku ulogu u budućem razvoju električne mreže svijetu. Detaljno se raspravlja o trendovima za UHV mreže, pametne mreže i za razvoj čiste energije. Osim toga, analizirane su i uspoređene važne funkcije međusobnog povezivanja velikih energetske mreže i četiri različita načina međusobnog povezivanja mreže: sinkroni AC, asinkroni DC, AC/DC paralelni i VFT asinkroni. Sinkronim načinom povezivanja izmjenične struje teško je postići prijenos električne energije na velike udaljenosti; DC asinkrono povezivanje oslanja se na veliki broj energetske elektroničkih uređaja kao osnovnu opremu za pretvaranje. Štoviše, problemi su složeni, visoki troškovi instalacije i održavanja te nedovoljna stabilnost sustava. Zbog svih navedenih razloga, kao jedno od rješenja u međusobnom povezivanju je VFT. U nastavku diplomskog rada VFT je glavni sadržaj svakog poglavlja i biti će ukratko predstavljen, [7], [12].

### 3. Varijabilni frekvencijski transformator (VFT)

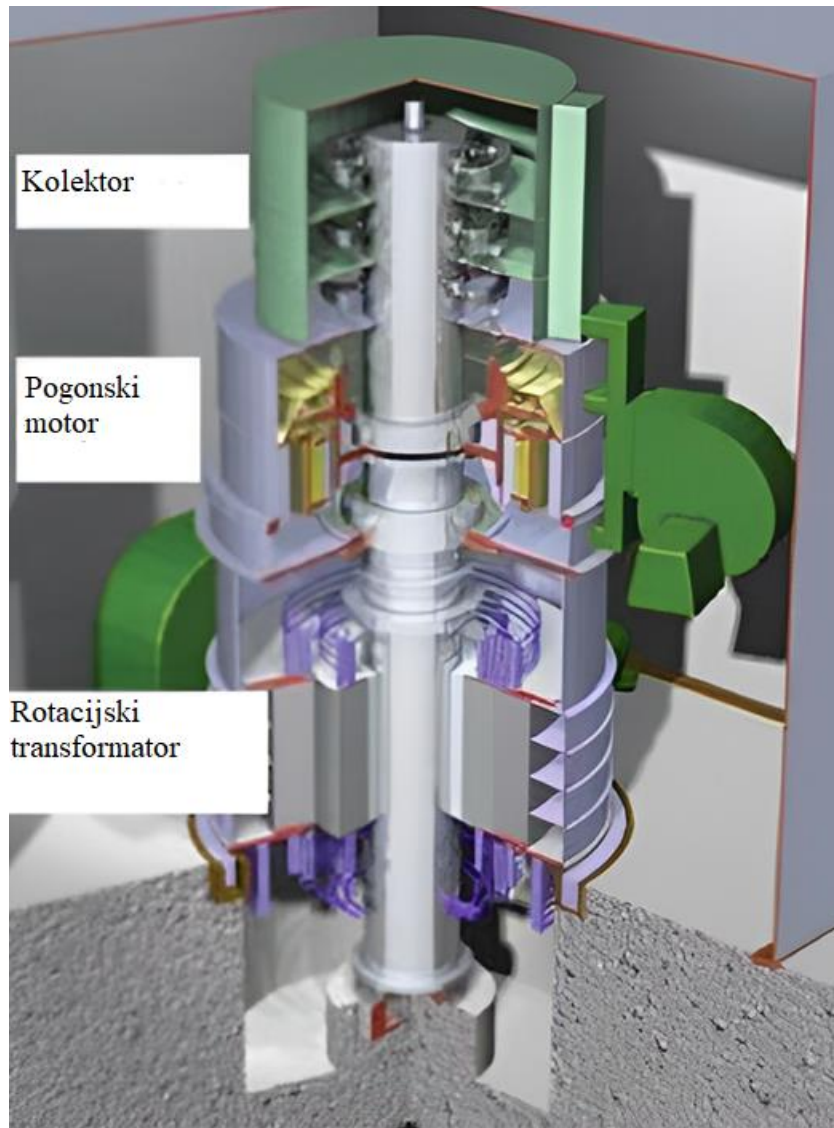
Kako bi se zadovoljila potražnja za optimalnom raspodjelom snage velikih razmjera i to prilagodili trendu razvoja velikih međusobnih povezivanja elektroenergetskih mreža, hitno je potrebno razviti tehnologiju i opremu za međusobno povezivanje elektroenergetskih mreža. U tim okolnostima nastala je nova vrsta opreme za međusobno povezivanje, varijabilni frekvencijski transformator. VFT-om se može ostvariti međusobno povezivanje dvije asinkrone mreže kao i fleksibilnu i glatku kontrolu prijenosa snage,[5]. Osim toga, VFT može opskrbljivati slabe energetske sustave, pa čak i pasivne sustave, isporučivanjem aktivne i jalove snage.

Od kada je prvi VFT primijenjen 2004. godine, posvećena je velika pažnja s povezanim studijima i simulacijama. U ovom poglavlju uglavnom je opisan osnovni koncept, fizička struktura, tijek rada, i osnovne funkcije VFT-a kao i njegovu primjenu u svjetskoj inženjerskoj praksi, raspravlja se o nužnosti razvoja upotrebe VFT-a, i sažeti su glavni problemi koje je potrebno riješiti kako bi se to primijenilo na novu vrstu tehnologije. Opisuje načine rada VFT-a, kontrolu tokova snage, promjenu frekvencije i njihov odnos s momentom i snagom pogona, [1].

Na slici 3.1. vide se dijelovi VFT-a. Iako je VFT koncept nov, VFT oprema se sastoji od dobro uhodane opreme kao što su istosmjerni motor i pogonske tehnologije promjenjive brzine. Uglavnom se sastoji od rotirajućeg transformatora, istosmjernog pogonskog motora i kolektorskog prstena. Kolektorski prsten se nalazi u gornjem dijelu VFT-a. Općenito se koriste ugljene četkice za provođenje struje između trofaznog namota rotora i vanjskog sustava. Dizajn, vijek trajanja i trenutni kapacitet četkica ključna su pitanja za troškove održavanja VFT-a, [6]. Istosmjerni motor je važna komponenta za kontrolu brzine rotora, podešavanje faznog pomaka namota rotora i magnetskog polja namota statora, kao i kontroliranje prijenosne snage VFT-a. VFT se može koristiti pri različitim faznim kutovima tijekom rada pa se također naziva i transformator za regulaciju faznog kuta. Istosmjerni motor se nalazi na sredini VFT-a i dijeli osovinu s rotorom. Na osovini rotora također je ugrađen namot rotora istosmjernog pogonskog motora koji može kontrolirati pogonski moment istosmjernog motora preko istosmjernog ispravljačkog kruga kako bi se prilagodila brzina rotora i fazni pomak rotora, kao i magnetsko polje statora. Prijenosni kapacitet VFT-a je određen zakretnim momentom na rotoru rotacijskog transformatora na koji djeluje istosmjerni motor. Pogonski motor je istosmjerni motor koji može regulirati moment i okretati se u bilo kojem smjeru. Pod pretpostavkom da moment djeluje u određenom smjeru, kako bi aktivna snaga tekla iz sustava na strani statora do sustava na strani rotora. Kada moment djeluje u suprotnom smjeru, snaga će teći iz sustava na strani rotora u sustav na strani statora. Unutra



projektiranog kapaciteta VFT-a, snaga prijenosa VFT-a, proporcionalna je momentu koji djeluje na osovinu rotora. Kada je snaga prijenosa nula VFT-a, potrebni okretni moment rotora je također blizu nule. Različito je od konvencionalnog brzog istosmjernog motora, istosmjerni motor koji se primjenjuje u VFT-u obično ima malu brzinu i može osigurati dovoljan zakretni moment u stacionarnom stanju ili blizu stacionarnog stanja.



*Slika 3.1.* Dijelovi VFT-a [6]

Rotacijski transformator se nalazi u donjem dijelu VFT-a. Rotacijski sklop je jezgra sustava. Kao što je ranije rečeno, rotacijski transformator je konvencionalni dvostruko namotani električni stroj s trofaznim namotima i na rotoru i na statoru, [1]. Namot rotora je s jedne strane povezan sa sustavom kroz kolektorski prsten, dok je namot statora s druge strane povezan sa sustavom izmjenične struje. Kontrolni sustav uspoređuje izmjerene vrijednosti snage s očekivanom zadanom vrijednošću, a zatim i vrijednosti odstupanja snage će se koristiti za podešavanje izlaznog momenta

istosmjernog motora. Veličina faznog pomaka ovisi o impedanciji rotacijskog transformatora i izmjenične mreže. U apsorpiranju jalove snage, VFT slijedi zakon izmjeničnog kruga, koja je određena reaktancijom propuštanja rotacijskog transformatora i kvadratom struje VFT-a. Istodobno, VFT također može apsorpirati jalovu snagu iz sustava s jedne strane i prenijeti dio jalove snage na sustav s druge strane. Ukratko, u VFT-u (vidi sliku 3.2), rotacijski transformator je glavni uređaj koja ostvaruje izmjenu snage između sustava s obje strane rotora i statora. Prijenos djelatne snage kroz VFT, dan je izrazom:

$$P_{VFT} = \frac{V_s V_r}{X_s} \sin[\theta_s - (\theta_r + \epsilon)] \quad (3-1)$$

gdje su  $V_s$  i  $V_r$  efektivni naponi statora i rotora,  $\theta_s$  i  $\theta_r$  su fazni kutovi na statoru i rotoru,  $X_s$  je induktivna reaktancija VFT-a. Prijenos snage kroz VFT ovisi o momentu koji se primjenjuje na rotor. Snaga teče od mreže povezane sa statorom do mreže povezane s rotorom kada se okretni moment primjenjuje u jednom smjeru. Smjer toka snage bit će obrnut kada se okretni moment primijeni u suprotnom smjeru, [5].

Istosmjerni motor je ključni uređaj za upravljanje brzinom rotora i snage prijenosa VFT-a. Kolektorski prsten je zadužen za izravnu električnu vezu između namota rotora i vanjskog sustava. Rotirajuće komponente imaju vrlo malu sposobnost prirodnog hlađenja zbog niske brzine vrtnje. Stoga ih je potrebno prisilno hladiti zrakom. Inercija rotora VFT-a obično je prilično velika, takva inercija može pomoći u održavanju stabilnosti tijekom poremećaja mreže.

### 3.1. Koncept i struktura VFT

VFT je uređaj za dvosmjerni prijenos električne energije. VFT može prenositi električnu energiju između dvije asinkrone mreže. Konceptija VFT-a se temelji na asinkronim strojevima. Jedna električna mreža spojena je preko rotora, a druga preko statora, [5]. Smjer i veličina tokova snage te upravljanjem frekvencijom regulirana je pogonom upravljačkog motora koji je povezan s rotorom VFT-a, [10]. Kroz ovo poglavlje se raspravlja o VFT konceptu i osnovnim principima rada kako bi se postavila teoretska osnova. U prvom dijelu opisan je VFT koncept i prikazana je njegova shema. Osim toga, objašnjeni su principi rada, tokovi snaga i različite primjene.

VFT je u osnovi kontinuirani fazni transformator koji radi pod različitim faznim kutom. Osnovna primjena VFT-a je povezivanje dva elektroenergetska sustava koji imaju istu frekvenciju i kontroliraju tokove snaga između dva sustava. Klasični fazni transformatori trpe od postupnog rada, spori su kako bi omogućili stabilnost povezanih sustava, a komponente nemaju dug vijek

trajanja zbog fizičkih naprezanja. U tim slučajevima u strukturu klasičnih faznih transformatora dodaju se energetske elektroničke uređaji kako bi se spriječili takvi problemi. Ugradnjom elektroničkih uređaja nastaju neki drugi problemi kao što su harmonici i rezonancija, niska tendencija preopterećenja i otpornost na toplinu. VFT kao fazni transformator nadilazi sve navedene nedostatke.

Struktura VFT-a također pomaže u kontroli protoka energije između dva asinkrona sustava. Druga alternativna metoda za povezivanje dvije električne mreže s različitim radnim frekvencijama je korištenje leđa-leđa (back-to-back) visokonaponske DC veze (HVDC). Takva veza također je ograničena zbog elektroničkih uređaja, [10].

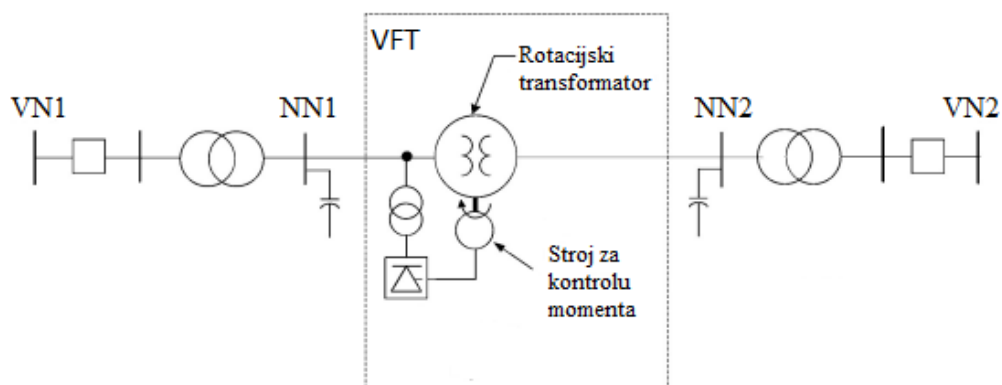
### **3.1.1. VFT koncept**

Glavna komponenta VFT-a je trofazni rotacijski transformator s integriranim namotom na rotoru i statoru. Magnetska spojka kroz zračni raspor prenosi snagu između dvije odvojene električne mreže koje se spajaju na stator, odnosno rotor, [10]. Za usklađivanje frekvencije asinkronih mreža koristi se pogonski motor promjenjive brzine, također kontrolira tokove snaga između dva povezana elektroenergetska sustava. Kao i svi ostali izmjenični strojevi, stvarni tok snage kroz VFT povezan je s razlikom kuta između statora i rotora. Na tokove snage utječe razlika faznog kuta koja je određena impedancijom VFT-a i povezanih mreža.

Tok snage kroz VFT proporcionalna je smjeru i veličini okretnog momenta na rotoru od strane pogonskog sustava. Kada su spojena dva sinkrona elektroenergetska sustava, rotor VFT-a ostaje u poziciji u kojoj su naponi statora i rotora u fazi s odgovarajućim sustavima. Pogonski sustav projektiran je za kontinuirano razvijanje okretnog momenta čak i dok rotor miruje. Kako je tok snage funkcija primijenjenog zakretnog momenta na rotoru, tada neće biti toka snage kroz VFT, ako na rotoru nema zakretnog momenta. U slučaju kada su povezana dva asinkrona elektroenergetska sustava, rotor VFT-a ima kontinuiranu brzinu vrtnje proporcionalnu odstupanju frekvencije elektroenergetskog sustava. Tok opterećenja se održava tijekom promjene frekvencije. VFT je projektiran za kontinuiranu regulaciju prijenosa snage uz ujednačavanje frekvencije. Bez obzira na prijenos snage, rotor se prirodno orijentira da prati nametnutu razliku faznog kuta od strane dvaju asinkronih energetske sustava.

VFT ima automatizirane postupke pokretanja i zaustavljanja. Kod pokretanja, VFT automatski poništava fazni kut preko sklopke, zatvara prekidač, a zatim uključuje regulator snage s nulom točkom. Nakon pokretanja, operator unosi željenu vrijednost za brzinu prijenosa snage i vrijednost brzine rampe (snaga/vrijeme). Regulacija prijenosa snage je normalan način rada. Za održavanje

prijenosa snage, VFT je opremljen regulatorom snage. Elektroenergetski sustavi podložni su smetnjama koje za posljedicu imaju odstupanja frekvencije ili napona. Upravljački sustav VFT-a stalno pomiče položaj rotora u odnosu na stator, kako bi se kompenzirala promjena frekvencije između dva povezana elektroenergetska sustava. Kontrolna petlja pomicanjem frekvencije omogućava konstantan prijenos snage. Kontrolna petlja za regulaciju snage dovoljno je brza da reagira na događaje u elektroenergetskom sustavu i održava stabilan prijenos snage. VFT sustavi su projektirane su za široki raspon sustava kao što su normalni i ekstremni uvjeti, [13]. Time se osigurava ispravan normalan rad i dovoljan raspon ako dođe do bilo kakvih uvjeta u mreži.

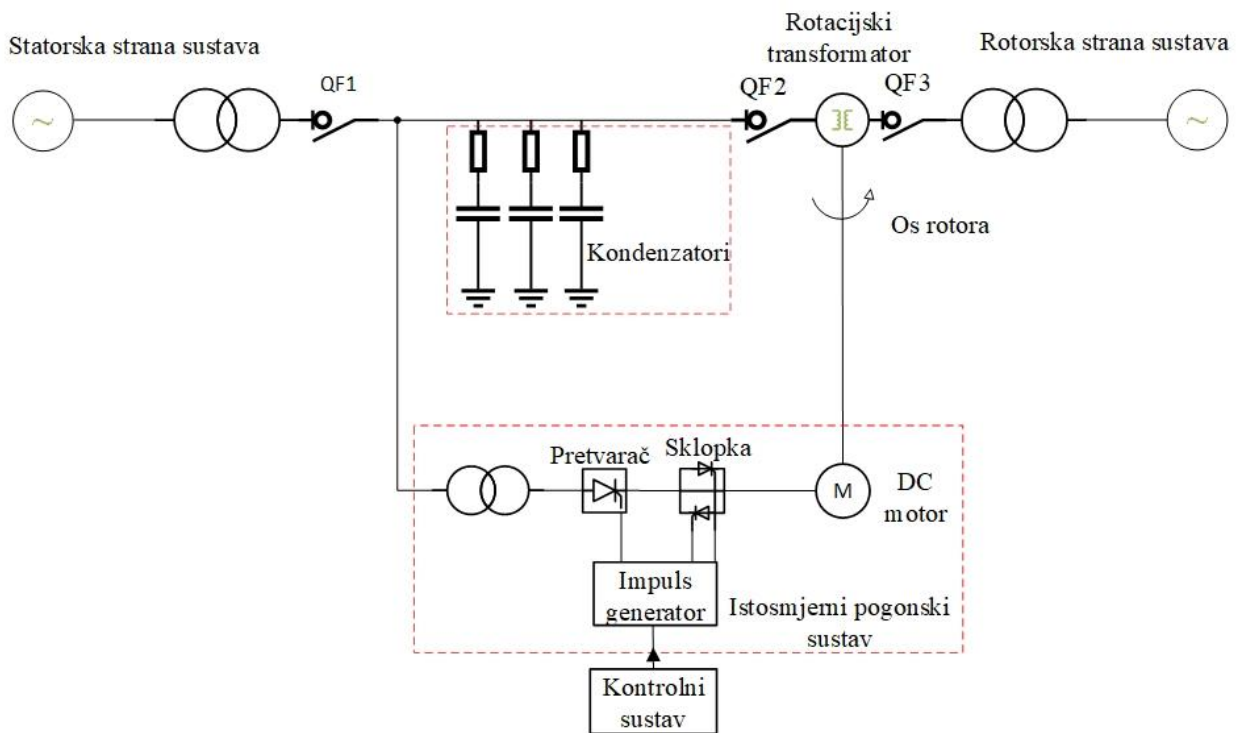


*Slika 3.2.* Konceptualni blok dijagram VFT-a [5]

### 3.1.2. Struktura i shema VFT

Integracija tehnologije mehaničkog gibanja, elektromagnetske teorije i pretvorbe električne energije u novi koncept kao što je VFT. VFT je kreativno osmišljen i genijalno dizajniran uređaj za pretvorbu energije koji se koristi u elektroenergetskim sustavima. VFT se sastoji od tri glavna dijela: rotacijskog transformatora, pogonskog motora i kolektora, shema prikazana na slici 3.3., [6]. To je novi uređaj za međusobno povezivanje asinkronih mreža. Rotacijski transformator je standardni električni stroj s trofaznim namotom i na rotoru i na statoru. Osnovna tehnologija VFT-a leži u kontroli kapaciteta i smjera aktivne snaga koja se prenosi preko VFT-a uključivanjem rotacijskog transformatora s trofaznim namotom i sa strane statora i sa strane rotora, osiguravajući sinkronizaciju rotora i magnetskog polja statora u rotacijskom prostoru kroz sustav istosmjernog motora i podešavanje faznog pomaka magnetskog polja rotora koji odgovara magnetskom polju statora. Regulacija brzine i zakretnog momenta na rotoru rezultira stabilnom razmjenom snage, [9]. Shema VFT sustava prikazana je na slici 3.2. U stvarnom elektroenergetskom sustavu, VFT uređaj uključuje komponente kao što su VFT, DC ispravljački i pogonski modul, DC motor,

silaznog transformatora (step-down transformer), kondenzatorski modul za kompenzaciju jalove snage i odgovarajući prekidač, [1].

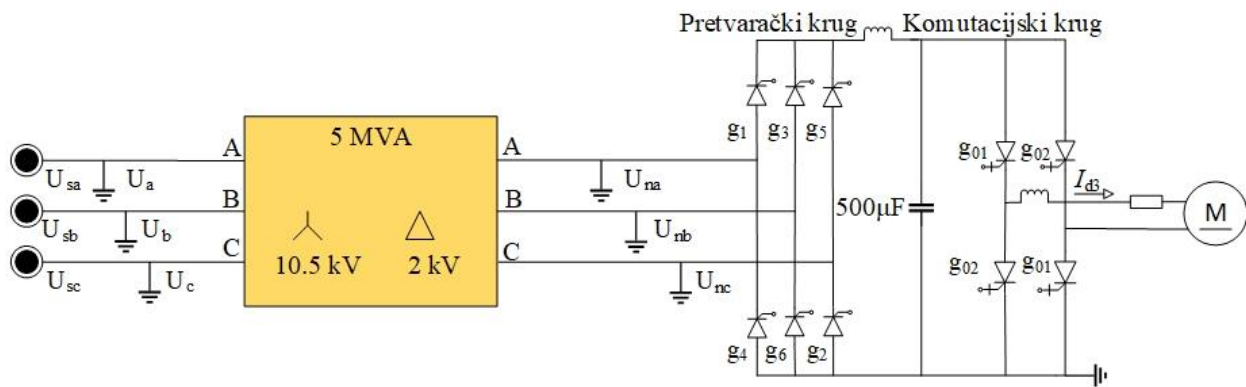


**Slika 3.3.** Shema VFT uređaja [1]

### 3.1.3. Dijelovi VFT

VTF se sastoji od nekoliko podsustava, kao što su istosmjerni ispravljač sa motornim pogonom, silaznog transformator, kondenzatorske baterije i prekidača, [1]. DC ispravljač i motorni pogon je sustav koji se sastoji od energetskog transformatora, šesto-mosnog ispravljačkog kruga, tiristorskog upravljačkog kruga, komutacijskog kruga s tiristorskim mostom i istosmjernog pogonskog motora, shema prikazana na slici 3.4. Pogonski motor i pogonski sustav promjenjive brzine koriste se za usklađivanje frekvencije kontinuiranom rotacijom u bilo kojem smjeru i za osiguravanje reguliranog momenta, čime se kontrolira smjer i veličina protoka snage kroz VFT. Istosmjerni pogonski sustav koristi tiristore za ispravljanje i IGBT za komutacijski krug,[20].

To se postiže kroz regulaciju ulazne struje i smjera namota istosmjernog motora kako bi se postigao cilj kontrole snage prijenosa. Za stvaranje istosmjernog pogona postoje različite tehnike. Kao pretvaračka komponenta, osim polu-reguliranog tiristora, koristi se bipolarni tranzistor s izoliranim vratima i ostali punoupravljivi energetski elektronički uređaji.



**Slika 3.4.** Shema pokretača istosmjernog motora

Napon međusobno povezanih sustava je obično 110 kV, zbog mehaničkog ograničenja i zbog dizajna izolacije VFT-a se ne može direktno spojiti. Kako bi se napon spustio između 15 i 25 kV na obje strane VFT-a koristi se step-down transformator. Standardni uzlazni (step-up) transformator se obično koristi kao step-down transformator, tako i u ovom slučaju. Prilikom odabira parametara transformatora u obzir treba uzeti aktivnu snagu koju VFT treba prenijeti, kao i faktor snage.

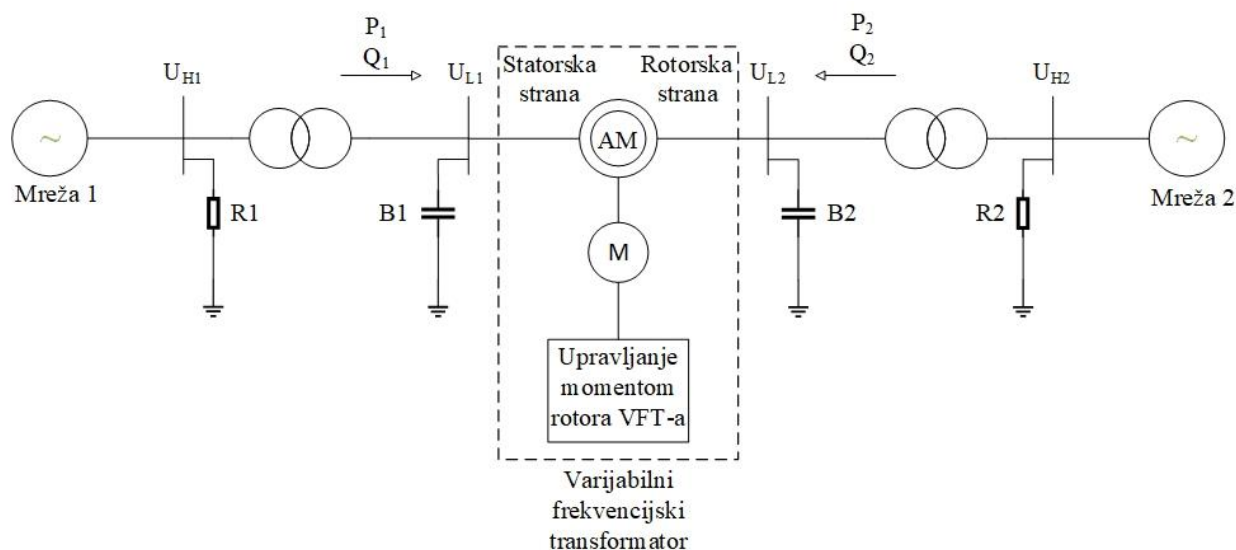
Veličina jalove snage ovisi o radnim uvjetima u električnoj mreži. Ukupna potrošnja jalove snage VFT-a može se razdvojiti na jalovu snagu koju troši reaktancija magnetiziranja i kombiniranu jalovu snagu koju troši reaktancija propuštanja statora i rotora VFT-a. Instalirane kondenzatorske baterije se uključuju i isključuju kako bi se kompenzirala potrošnja jalove snage VFT-a i prijenosne mreže. Na temelju promjene struje i napona VFT-a, odgovarajući kapacitet kondenzatorskih baterija se automatski mijenja. Ova kontrolna funkcija ima tri načina rada, Power Schedule Mode koji radi kao funkcija brzine prijenosa snage VFT-a, Voltage Mode je funkcija koja održava napon sabirnice unutar zadanog raspona prebacivanjem kondenzatorskih baterija i zadnji način je Manual Mode u kojem operater uključuje i isključuje kondenzatorske baterije, [6]. Na temelju uputa sustava, VFT se uključuje i isključuje prekidačem kako bi se postigla sinkrona veza i izolacija sustava s obje strane. Osim toga, može brzo ukloniti kvarove na temelju zahtjeva za mjerenjem i zaštitu sustava kako bi se osigurala sigurnost sustava i opreme, kao i stvorili uvjeti za siguran rad i održavanje.

## 3.2. Osnovne funkcije VFT

VFT ima funkcije slične onima u leđa-leđa (back-to-back) sustavu istosmjernog prijenosa (HVDC), [6]. Osnovno sredstvo za realizaciju različitih funkcija VFT-a je regulacija brzine i regulacija snage. Regulacija brzine je osnova za sve kontrole, odnosno, kontrola brzine rotora kako bi se osiguralo da magnetsko polje formirano od struje namota rotora je sinkrono s magnetskim poljem koje stvara struja namota statora, što je temeljna pretpostavka za stabilna rad VFT-a, [14]. Iz perspektive mehaničkog kretanja, odnosno prilagođava se ekvivalentno magnetsko polje namota rotora i fazni pomak magnetskog polja namota statora. U slučaju abnormalnog stanja u električnoj mreži, vrijednost kontrolne snage se mijenja kako bi se postiglo smanjenje oscilacija snage, i time se postiže veća stabilnost i pouzdanost. VFT također poboljšava kvalitetu električne energije i učinkovitost novih i konvencionalnih obnovljivih izvora energije. Na primjer, VFT može nadvladati lošu kvalitetu električne energije pučinskih vjetroelektrana uzrokovanu svakidašnjom fluktuacijom snage, [21]. Osim toga, povećava učinkovitost hidroelektrana pri promjenjivoj brzini.

### 3.2.1. Asinkrono povezivanje

Međusobno povezivanje elektroenergetskih mreža uz stvaranje protoka energije između različitih područja, povećava pouzdanost elektroenergetskih mreža i ostvaruje ravnotežu neusklađenosti u ponudi i potražnji u nekom području, [22]. Točnije, time se postiže sinkronizacija magnetskog polja struje namota rotora i magnetskog polja struje namota statora. Kontrolom gibanja rotora stvara se stabilna veza između asinkronih energetskih mreža. VFT prenosi djelatnu i jalovu snagu. Poboľšana pouzdanost elektroenergetskih mreža povećava kvalitetu energije i smanjuje rizik od prekida napajanja. Osim toga povećava fleksibilnost i raznolikost izvora energije što povećava energetska sigurnost i smanjuje troškove energije kao i troškove razvoja elektroenergetskih mreža, [23], [24]. Asinkrono povezivanje daje pozitivne učinke za oba povezana sustava. Asinkrono povezivanje preko VFT-a služi kao zaštita za oba povezana sustava, on sprječava širenje kvarova između povezanih sustava. Osim toga, u slučaju kvara sustava, VFT ograničava povećanje struje kratkog spoja. Međusobne veze trebaju biti jednostavne i primjenjive za asinkrone i sinkrone elektroenergetske sustava. Također trebaju biti isplative, sigurne i pouzdane za elektroenergetske sustave. VFT je prikladan za rubno povezivanje između velikih energetskih mreža i međusobnog povezivanja slabih ili malih energetskih mreža na glavne mreže. U ovoj metodi, ako se u sustavu na obje strane dogodi greška u gubitku napajanja, sustav sa druge strane osigurat će napajanje crnim startom preko VFT-a. Na slici 3.5. vidi se shematski prikaz povezivanja asinkronih mreža.



**Slika 3.5.** Shema VFT-a za korištenje povezivanja asinkronih mreža

Istosmjerna struja visokog napona (HVDC), varijabilni frekvencijski transformator (VFT) i fleksibilne asinkrone veze izmjenične struje (FACTS) dostupne su tehnologije za međusobno asinkrono povezivanje, [25]. Ovakvi primjeri povezivanja se javljaju u Kini, Japanu, Meksiku i Brazilu. Drugi način primjene asinkronog povezivanja je kod povezivanje otoka s kopnom, u tom slučaju istosmjerni vodovi su isplativiji od trofaznog voda.

### 3.2.2. Kontrola prijenosa snage i frekvencije

Kontrola snage je osnovna funkcija VFT-a kao i osnovna funkcija serijskog fleksibilnog uređaja izmjeničnog prijenosnog sustava (FACTS). Prijenos snage s jedne mreže na drugu je izvedena rotacijom rotora VFT-a. Time se kontrolira razmjena snage međusobno povezanih elektroenergetskih sustava na temelju zahtjeva za razmjenu energije u dispečerskom planu kako bi se postigao kontrolirani prijenos električne energije između međusobno povezanih elektroenergetskih sustava. Veličina toka snage ovisi o primijenjenom momentu i njegova vrijednost varira proporcionalno primijenjenom momentu. Prijenos snage je sa strane statora na stranu rotora ako se okretni moment primjenjuje u suprotnom smjeru. Kada mreža izgubi sinkronizam, rotor rotacijskog transformatora okretat će se kontinuirano brzinom proporcionalno razlici u veličinama frekvencija između obje povezane električne mreže. Kontinuirani tok snage održava se tijekom cijelog rada bez obzira na razliku frekvencija mreža u radu. VFT ima sposobnost prijenosa snage bez prekida s promjenom frekvencije mreže. Čak i u slučaju asinkronog toka energije, rotor se prilagođava kako bi pratio razliku u faznom kutu uzrokovanu dvjema mrežama koje nisu sinkrone.



Kada promjena frekvencije sustava na bilo kojoj strani premašuje zadanu vrijednost, prijenosna snaga i smjer VFT-a mogu se promijeniti unutar projektnog kapaciteta VFT-a. Opseg VFT-a dopušta povećanje frekvencije pomoću niže frekvencije i smanji frekvenciju pomoću više frekvencije, što je ekvivalentno korištenju sustava s jedne strane kao napajanja sustava za modulaciju frekvencije s druge strane kako bi se maksimalno održavala frekvencija sustava s obje strane u dopuštenom opsegu, [1].

### **3.2.3. Napajanje slabih sustava i ostale funkcije VFT-a**

Za razliku od konvencionalne istosmjerne struje koja se temelji na principu komutacije struje, VFT ne treba podršku mrežnog napona u radu. Kao rezultat toga, može se koristiti za napajanje slabih sustava, pa čak i pasivnih sustava. Kao pravi primjer poslužiti će prva stanica opremljena VFT-om, Langlois,[6], [26]. Lokalna električna mreža na jednoj strani je otočna, pa da li ovaj izolirani sustav ima lokalno napajanje ili ne, VFT će nastaviti raditi. Ako nema lokalnog napajanja, VFT će automatski opskrbiti svu snagu unutar svog radnog graničnog raspona izoliranim sustavom. Ako postoji lokalno napajanje, VFT će kompenzirati razliku između lokalnog napajanja i lokalnog opterećenja te preuzeti zadatak regulacije frekvencije zajedno s regulatorom lokalnog generatora.

Crni start je pokretanje proizvodne jedinice u izvan pogonskom stanju bez prisustava mrežnog napona u stanje spremnosti za sinkronizaciju, odnosno preuzimanje opterećenja. Njegova svrha je uspostava ponovnog napajanja korisnika mreže nakon raspada dijelova elektroenergetskog sustava ili potpunih raspada sustava. Crni start ključan je za ponovno uspostavljanje sigurnog rada električne mreže. Kada je sustav uključen jedna strana prestaje raditi zbog kvara i potrebno je vratiti napajanje, sustava s druge strane može obnoviti napajanje sustava putem VFT-a, osigurati napajanje crnog starta. U međuvremenu može učinkovito izolirati problem koji bi mogao biti uzrokovan normalnom sustavu u procesu crnog starta.

Ako u međusobno povezanim sustavima postoje prigušene niskofrekventne oscilacije, VFT razmjenjuje snagu između međusobno povezanih sustava. Snaga koja se razmjenjuje između sustava može se dinamički regulirati kroz funkciju regulacije snage, a prigušenje niske frekvencije se može eliminirati odabirom odgovarajućim parametrima, [27]. Osim ublažavanja niskofrekventnih oscilacija, VFT se može koristiti za regulaciju snage za vrijeme poremećaja u elektroenergetskom sustavu. Općenito, u slučaju velikih smetnji u sustavu izlazna snaga VFT-a će se u vrlo kratkom vremenskom razdoblju prilagoditi na unaprijed postavljenu vrijednost prema prethodno postavljenoj krivulji snage za pružanje potpore napajanja za vrijeme poremećaja.

### 3.3. Upravljanje VFT

Pokretanje i kontrola su rutinske operacije VFT-a. Glavni radni procesi u slučaju kada su međusobno povezana dva sustava izmjenične struje biti će opisani u ovom dijelu rada. Na slici 3.3., prvo zatvoriti sklopku QF1, a zatim zatvoriti sklopku na strani statora (npr. QF2), takav postupak predstavlja uključivanje VFT-a bez opterećenja. Kako je jezgra VFT-a zasićeni element, u slučaju bez opterećenja može se inducirati udarana struja. U tom trenutku, fazni kut se može iskoristiti za kontrolu uključivanja VFT-a. Općenito, kada napon dosegne vršnu vrijednost, uključivanjem VFT-a inducirati će se minimalna udarna struja. Stoga bi se naredba za uključivanje trebala izdati na temelju kašnjenja rada prekidača i valnog oblika izlaznog napona, [28]. Nakon pokretanja bez opterećenja, na red dolazi podešavanje brzine podešavanja rotora. Detektirati frekvenciju sustava s obje strane, izračunati frekvencijsku razliku, a zatim prilagoditi izlazni moment istosmjernog motora i kontrolirati brzinu rotora kako bi frekvencija indukcijskog napona namota rotora bila u skladu s frekvencijom sustava na drugoj strani. U tom trenutku bi frekvencija napona na obje strane prekidača QF3 bila usklađena jedna s drugom. Još jedna važna stvar kod upravljanje je sinkronizacija zatvaranja. Podesiti kutnu razliku magnetskog polja rotora kako bi napravili faznu razliku u naponu između sustava s obje strane prekidača QF3 unutar zadanog raspona. Kada je potrebno, podesiti napon sustava kako bi napravili razliku u amplitudi napon između sustava s obje strane QF3 unutar zadanog raspona. Zatim zatvoriti prekidač kako bi dvije električne mreže postigle asinkrono povezivanje uz malu snagu izmjene, [1].

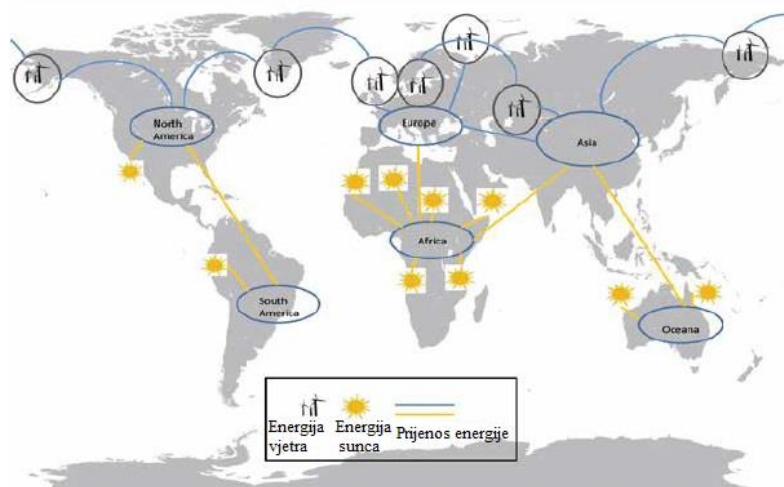
Na osiguravanju stabilne frekvencije VFT-a, treba prilagoditi kutnu razliku između magnetskog polja struje namota statora i magnetskog polja struje namota rotora kako bi prilagodili snagu prijenosa VFT-a na unaprijed postavljenu vrijednost. Na taj način se regulira snaga prijenosa. U skladu sa stvarnim potrebama za upravljanjem rada elektroenergetskog sustava, kontrola snage je osnovna funkcija. Kontrolom snage kontrolira se niz funkcija kao što su regulacija frekvencije, eliminiranje niskofrekventnih oscilacija, optimizacija tokova snaga i napajanje slabih i pasivnih elektroenergetskih sustava. Nakon svih nabrojanih stavki, potrebno je otkloniti greške. Za kratkoročnu vanjsku grešku, općenito nema potrebe poduzeti nikakve mjere jer nakon uklanjanja greške VFT sustav će nastaviti s normalnim radom. Za dugotrajnu ili trajnu vanjsku grešku, kao i grešku VFT-a, treba ukloniti preko sklopke prema zaštiti.

Kada VFT prenosi snagu, ukupna reaktancija, uključujući step-down transformatore s obje strane, apsorbirat će određenu količinu jalove snage, što će rezultirati padom napona i povećanjem gubitka sustava. U tom trenutku potrebno je izmjeriti struju VFT-a i napon na sabirnici i uključiti

kondenzatorske baterije. Kondenzatorske baterije određenog kapaciteta uključuju se jednu po jednu kako bi se optimizirali tokovi jalove snage. Kod odabira kapaciteta kondenzatore baterije, postoje dvije metode. Jedna se temelji na minimalnoj jalovoj snazi. Odnosno, jalova snaga koju daje kondenzatorska baterija mora biti jednaka jalovoj snazi koju apsorbira reaktancija VFT-a i step-down transformator. Druga je promjena kapaciteta kondenzatorske baterije, na temelju kontrole napona na naponskoj sabirnici unutar nekog zadanog raspona. Prebacivanje kondenzatorskih baterija ovisno o opterećenju elektroenergetskog sustava se također može nazvati upravljanjem VFT-om, [1], [15].

### 3.4. Primjena VFT u velikim elektroenergetskim sustavima

Global energy interconnection (GEI) bi predstavljao završnu fazu prirodnog napredovanja elektroenergetskih mreža prema sve većoj međusobnoj povezanosti: globalno međusobno povezani elektroenergetski sustav, podržan infrastrukturom pametne mreže, koji optimalno koristi UHV tehnologiju za prijenos energije na veliku udaljenost. U dosadašnjem postojanju VFT-a posvećeno je puno pozornosti na analizu i simulaciju na međusobno povezanim elektroenergetskim mrežama. Takve velike elektroenergetske mreže čine okosnicu za primjenu čiste energije (Clean Energy), omogućujući odgovarajuću raspodjelu postrojenja za proizvodnju električne energije tamo gdje su resursi najbolji. Kina je provela veliko istraživanje i razvoj te primjenu novih tehnologija kao što su UHV, fleksibilna istosmjerna mreža, skladištenje i prijenos energije vjetra. Upravo je na tome koncipiran GEI: široka primjena čiste energije, posebno varijabilnih obnovljivih izvora energije. Prijenos snage na velike udaljenosti, što zahtijeva UHV tehnologiju i pametne mreže rješenje koje iskorištava inteligentni nadzor i kontrolu na svim naponskim razinama (slika 3.6.).



**Slika 3.6.** Konceptualni prikaz Global energy interconnection [2]

Glavna prednost GEI je postizanje vrlo visoke razine međusobnog povezivanja na velikim geografskim područjima i omogućuje stvaranje platforme za prijenos električne energije, s većom ravnotežom potražnje i ponude električne energije. Na globalnoj razini, to bi predstavljalo sustavnu platformu za primjenu čiste energije i pristup električnoj energiji s niskom razinom ugljika i rezultiralo potencijalnim ekonomskim, društvenim i ekološkim koristima. Globalna mreža bi mogla donijeti dobrobit za okoliš, budući da bi činila okosnicu za razvoj obnovljive energije, gdje su takvi resursi optimalni iz perspektive elektrane.

GEI ideja oslanja se na razvoj nacionalnih mreža, razvoj koji bi bio usklađen s povećanim razinama međusobnog povezivanja u transnacionalnim i transkontinentalnim mrežama, [2]. Tehnologija visoko naponskog prijenosa i tehnologije koje omogućuju pametno praćenje i kontrolu električnih mreža činile bi okosnicu takvih mreža, postavljenih kako bi se olakšale veze s bazama energije vjetra u sjevernim geografskim širinama i na Arktiku, baze solarne energije u ekvatorijalnim regijama kao i glavne baze obnovljivih izvora energije i glavni centri opterećenja na svim kontinentima. Razvoj proizvodnje i povećanje kapaciteta prijenosa i distribucije, podijelio bi budući razvoj međusobno globalno povezane elektroenergetske sustave u tri faze:

- Prva faza: vlada, vlasnici i operativni sustav, komunalna poduzeća i drugi dioničari postigli potpuno usklađivanje s ciljem povećanja stupnja međusobnog povezivanja
- Druga faza, u kojoj bi se promicalo transnacionalno međusobno povezivanje unutar svakog kontinenta i čista energija velikih razmjera, razvijale bi se nove baze kao što su vjetroelektrane u Sjevernoj Europi, solarne elektrane u Kini i solarne elektrane u sjevernoj Africi
- Treća i posljednja faza, u kojoj bi udaljenija energetska čvorišta započela s razvojem energije vjetra na sjevernim geografskim širinama i Arktiku i solarne energije oko ekvatora, te bi se počelo pojavljivati transkontinentalno povezivanje, [2].

Nova vrsta opreme za međusobno povezivanje, VFT primjenjuje se od 2010. u Sjedinjenim Američkim Državama. Primjena VFT tehnologije igrat će važnu ulogu u povećanju kapaciteta i fleksibilnosti rada sustava međusobno povezanih energetskih mreža. VFT tehnologija može se koristiti za međusobno povezivanje slabih elektroenergetskih mreža i velikih elektroenergetskih sustava, vjetroelektrana i glavnih elektroenergetskih mreža. VFT igra glavnu ulogu u kineskom međusobnom povezivanju mreža i razvoju pametne mreže.

### 3.4.1. Mreže ultra visokog napona (UHV grid) i tehnologija čiste energije

UHV elektroenergetske mreže se sastoje od izmjeničnog sustava od 1000 kV i više, i istosmjernog sustava 800 kV i više. UHVAC je danas već uhodana tehnologija, koja se počela razvijati još 1960-ih istovremeno u bivšem Sovjetskom Savezu, SAD-u, Japanu i Italiji. Prednosti UHVAC mreža su velika udaljenost prijenosa, veliki kapacitet, visoka učinkovitost, mali gubici vodova i visoka razina sigurnosti. S velikim potencijalom za međusobno povezivanje i prijenos snage, UHVAC ključna je tehnologija za izgradnju ultra velikih mreža. UHVAC 1000 kV ima veći kapacitete od 4 do 5 puta, veću udaljenost i učinkovitost 3 puta od 500 kV izmjeničnog prijenosa. UHVDC je druga opcija za prijenos velikih količina električne energije na velike udaljenosti. Trenutačno jedna varijanta tehnologije, visokonaponski DC (LCC-HVDC) temeljen na pretvaraču s linijskim komutiranim pretvaračem, također poznat kao HVDC temeljen na pretvaraču strujnog izvora (CSC-HVDC), ovaj tip može doseći ultra visoki napon. LCC-HVDC tehnologija je zrela tehnologija, koja je prvi put komercijalno uvedena 1954. Trenutno je to opcija za prijenos električne energije na velike udaljenosti, velikog kapaciteta, od točke do točke, kao i za povezivanje AC mreža s različitim frekvencijama sustava. U odnosu na klasični izmjenični prijenos, pruža prednosti kao što su smanjeni gubici, niži troškovi, manji presjek i bolja upravljivost. U velikim zemljama u razvoju kao što su Brazil, Kina, Indija i Južna Afrika, gdje još treba izgraditi mnogo energetske infrastrukture i postoji potreba za prijenosom energije vrlo velike snage na vrlo velike udaljenosti, UHVDC prijenos je planiran ili postavljen na visok stupanj posljednjih godina. Od navedenih zemalja, Kina je najnaprednija u razvoju UHV tehnologije i ima vodeću tehnološku razinu. UHV standarde koje je Kina postavila, postali su međunarodni standardi. Njihova glavna svrha je prijenos energije proizvedene u sjevernoj i zapadnoj Kini do centara za punjenje u središnjoj Kini i duž kineske obale. Udaljenost prijenosa ovih  $\pm 800$  kV UHVDC projekta kreće se od 1 100 km do 2 400 km. 2016. je započela izgradnja prvog svjetskog projekta  $\pm 1 100$  kV UHVDC, s udaljenošću prijenosa od 3 324 km i nazivnom snagom od 12 GW. Do 2018. Kina je izgradila i pustila u rad 21 UHV projekt od toga 8 AC projekata i 13 DC projekata, [1].

Trenutna tehnologija UHV prijenosa već se može primijeniti za izgradnju okosnica mreža za velike međusobno povezane regionalne i transnacionalne elektroenergetske mreže, a na kraju i za GEI. Udaljenost između nekih velikih globalnih energetske baza i velikih potrošača može biti od 2 000 km do 5 000 km. Takva udaljenost prijenosa može biti i ekonomski isplativa za UHV tehnologiju. Na primjer, UHVAC mreže bi se po mogućnosti koristile za prikupljanje energije na strani napajanja ili za isporuku energije na strani potražnje, dok bi se UHVDC mogao koristiti za

prijenos energije od točke do točke. Udaljenosti duže od 5 000 km, snaga bi se potencijalno mogla prenositi pomoću  $\pm 1\,500$  kV UHVDC tehnologije, takav način je trenutno u fazi demonstracije.

Razvojem VFT-a, na temelju naprednih komponenti energetske elektronike velikog kapaciteta i inovativnih strategija upravljanja. To je uvelike poboljšalo upravljivost, fleksibilnost, stabilnost i povećalo kapacitet AC prijenosa. VFT se također koristi kod varijabilnih obnovljivih izvora za kontrolu napona i tokova snage.

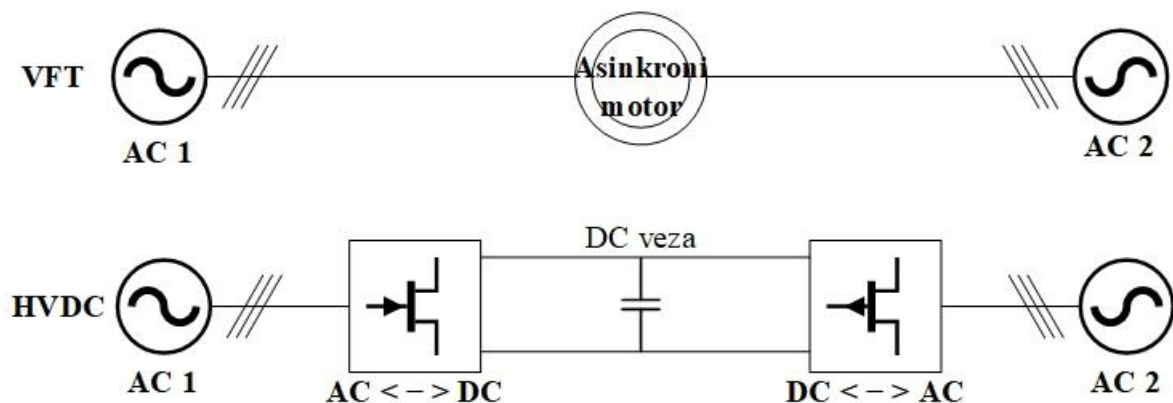
Razvoj čiste energije temeljna je zadaća izgradnje globalne energetske mreže (GEI). Već dugo vremena električna energija se uglavnom proizvodi korištenjem ugljena, prirodnog plina, nuklearne energije i pomoću hidroelektrana. Upotrebom fosilnih goriva dovelo je do problema kao što su zagađenje okoliša, klimatske promjene i nestašica resursa. Od industrijske revolucije, globalna prosječna temperatura porasla je za  $1^{\circ}\text{C}$ . Ako se situacija ne kontrolira, doći će do ozbiljnih ekoloških katastrofa. Kako bi se to spriječilo, osnovno rješenje je smanjiti energiju iz fosilnih goriva. Zamjenu za fosilna goriva treba tražiti u „čistim“ energijama kao što su sunčeva energija, energija vjetra i hidroenergija. U budućnosti će GEI uglavnom prenositi energiju iz „čistih“, izvora. Najveći problem „čiste“, energije su izvori energije koji su neravnomjerno raspoređeni u svijetu. Tek nakon što se integriraju u velike električne mreže, mogu ostvariti veliki razvoj, što znači da moramo konstruirati GEI za učinkovit razvoj čiste energije te je distribuirati i koristiti u širem rasponu, [2].

### **3.4.2. Usporedba HVDC i VFT tehnologije za asinkrono povezivanje**

HVDC je alternativna tehnologija za povezivanje dvaju neovisnih elektroenergetskih sustava putem visokonaponskog sustava istosmjerne struje (HVDC). Prema radnim uvjetima i lokaciji međusobnog povezivanja, HVDC sustav može imati leđa-leđa (back-to-back) ili točka-točka (point-to-point) konfiguraciju. HVDC može ostvariti monopolarnu ili bipolarnu istosmjernu vezu, [10]. U uspoređi s VFT tehnologijom, HVDC sustavi su jako složeni, potrebno puno više prostora za instalaciju, generiraju harmonike, veliki utjecaj na nedaleke generatore, zahtjevana integracija s mrežom, bez opcije pokretanja u crnom stanju, manja mogućnost otklanjanja kvarova zbog mehaničkih razloga i veće kontrole, [6], [9], [25]. Gledano iz njihovog povećanje snage, VFT ima projektirani jedinični kapacitet od 100-300 MW; DC back-to-back prijenosni sustav ima projektirani kapacitet jedinice od nekoliko tisuća megavata. VFT je modularna oprema koja ima lakši proces proširenje kapaciteta jednostavnom paralelnom vezom stare i nove opreme, tako da ima visoku prilagodljivost za već izgrađene elektroenergetske sustave i kapacitet se može postupno povećavati. HVDC back-to-back prijenosni sustav može proširiti svoj kapacitet pomoću metoda

kao što su paralelno povezivanje ili serijsko povezivanje, ali mu je potreban cjelokupni dizajn na početku njegove izgradnje jer njegovi stari i novi moduli imaju veliki međusobni utjecaj. Gledano iz njihovih gubitaka aktivne snage, gubici aktivne snage VFT-a uglavnom uključuju gubitke u praznom hodu, gubitke otpora namota, gubitke otpora kruga ispravljača i gubitke hlađenja stvarne vrijednosti oko 1 %, dok gubici HVDC tehnologije oko 3 %. Gubitke HVDC tehnologije čine gubici otpora u praznom hodu, gubici otpora namota oba transformatora, gubici zbog tiristora i gubici za hlađenje transformatora.

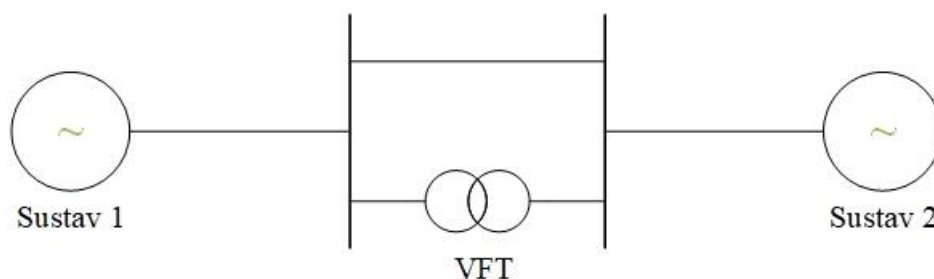
Sa sličnim funkcijama, VFT i HVDC mogu se koristiti za povezivanje asinkronih mreža, ali njihove tehničke izvedbe su prilično različite. U usporedbi s VFT tehnologijom, HVDC sustavi pate od složenosti, znatno više zahtjeva za instalacijskim prostorom, visokog generiranja harmonika, velikog utjecaja na obližnje generatore, komplicirane integracije s mrežama, bez mogućnosti pokretanja u crnom stanju, manje rješavanja kvarova zbog manjeg toplinskog kapaciteta i veće kontrole. Osim navedenih problema, VFT ima prednost i financijskom smislu, kod povezivanja istih performansi VFT zahtijeva 70% manje ulaganja, [3].



*Slika 3.7.* Shema povezivanja elektroenergetskog sustava [3]

### 3.4.3. Korištenje VFT za smanjenje niskofrekventnih oscilacija sustava i poboljšanje karakteristika nestabilnog napajanja

Niskofrekventne oscilacije su jedan od najčešćih problema u povezivanju velikih elektroenergetskih sustava. Povećanje sustava dolazi do povećanja inercije, povećava se električni razmak između jedinica, i time se povećava vjerojatnost pojave niskofrekventnih oscilacija. Kako bi se to spriječilo spaja se VFT, koji se spaja serijski u međusobno povezanim sustavima ili u paralelnu granu u kojoj je serijski spojen VFT. Takvim rješenjem dinamički kontroliraju se tokovi snaga, povećava se prigušenje sustava i sprječavaju ili smanjuju niskofrekventne oscilacije. Na slici 3.8. prikazana je shema spajanja VFT-a za smanjenje niskofrekventnih oscilacija.



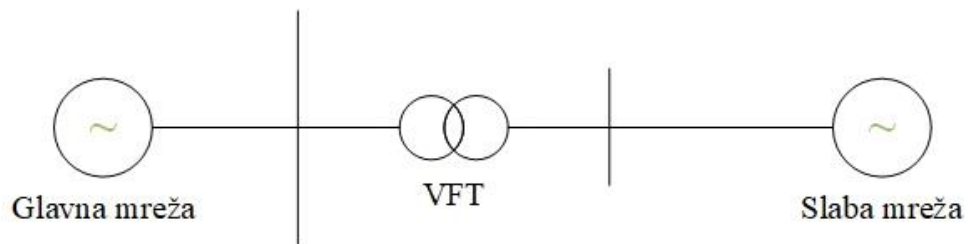
**Slika 3.8.** Shema za korištenje VFT-a za smanjenje niskofrekventnih oscilacija

Solarna energija i energija vjetra imaju problem kao što su nepredvidljivost i stabilnost. Ako su lokalne mreže povezane s nestabilnim izvorima napajanja, to bi moglo utjecati na lokalno napajanje, pa čak i ugroziti sigurnost cijelog električnog sustava. Ako se VFT koristi u mrežama sa nestabilnim napajanjem, može smanjiti utjecaj nestabilnog napajanja. Osim toga, može osigurati pouzdan prijenos i opskrbu električnom energijom, te osiguravaju upravljivije metode povezivanja na mrežu za energiju vjetra, solarnu energiju i druge vrste napajanja. Kako VFT-ovi mogu učinkovito izolirati utjecaj promjene u malom sustavu na veliki sustav. Daljnjim ispitivanjem je utvrđeno da mreže povezane s velikim vjetroelektranama, pomoću VFT-a mogu značajno poboljšati stabilnost sustava. Taj rezultat dati će veliki utjecaj na energetske razvoj. Ako se VFT ne koristi u sustavu, potreban je veliki broj shunt kondenzatora. U Kini je veliki broj vjetroelektrana daleko od centara opterećenja. Kako lokalna mreža ima malo opterećenje i smanjenu sposobnost prilagodbi vjetroelektrani i ako je izravno povezana s vjetroelektranom postoji veliki rizik za nestabilno stanje. Ako se VFT koristi za povezivanje vjetroelektrana s lokalnim opterećenjima, to će biti od koristi za smještaj neke vjetroelektrane na licu mjesta, poboljšavajući krajnju elektroenergetsku mrežu i poboljšavajući prijenosni kapacitet vjetroelektrane.

#### **3.4.4. Ostali načini korištenja VFT**

Jedan od načina korištenja VFT je povezivanje glavnih mreža sa slabim mrežama preko VFT-a. Slabe mreže imaju krhku strukturu, nisku razinu stabilnosti i lošu pouzdanost napajanja. Ako se takva mreža izravno spaja na glavnu mrežu, to može ugroziti pouzdanost i stabilnost napajanja cijelog sustava. Zbog navedenih razloga za povezivanje takvih mreža koristi se VFT. VFT će osigurati stabilnost sustava, na slici 3.9. vidi se koncept povezivanje slabih mreža sa glavnim mrežama preko VFT-a.



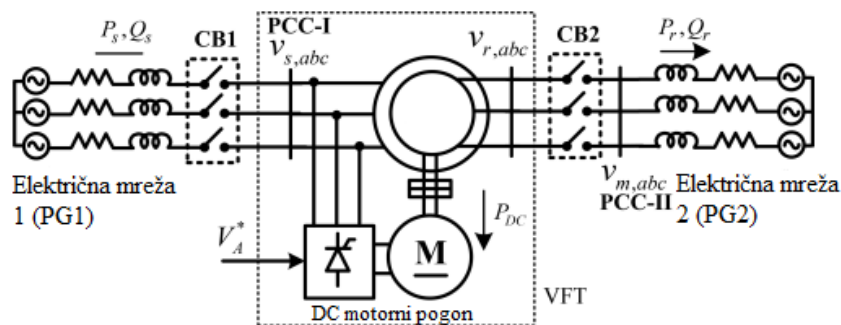


**Slika 3.9.** Shema povezivanja slabih mreža sa glavnim mrežama preko VFT

S razvojem elektroenergetskih mreža obično postoji puno petlji u elektroenergetskom sustavu. U starijim elektroenergetskim sustavima vodovi su bili malog presjeka i imaju velike gubitke u tokovima snaga. Osim toga, neki vodovi su preopterećeni. U takvim sustavima VFT može se koristiti za optimizaciju distribucije tokova snaga u sustavu, smanjenje gubitka sustava, sprječavanje preopterećenja nekih vodova i tako dalje.

## 4. Upravljanje i kontrola sustavom i elementima VFT

U raznim literaturama predlažu se različite strategije upravljanja kako bi se postigla glatka kontrola prijenosa djelatne i jalove snage te siguran i pouzdan rad VFT-a, [4], [29], [30]. Na temelju osnovne teorije rada VFT-a, njegova osnovna kontrola, je kontrola gibanja rotora, a to uključuje kontrolu brzine rotora i faznog pomaka struje magnetskog polja između rotora i statora. Osim toga, zbog potražnje za regulacijom snage VFT-a, trebao bi biti u stanju regulacije rotora naprijed i unazad, u stanju mirovanja, i sa svime navedenim, rotor bi trebao imati beskonačnu regulaciju momenta rotora. Metode upravljanja mogu popraviti dinamički odziv VFT-a tijekom poremećaja i smanjiti širenje kvara s jedne strane VFT-a na drugu stranu, [9]. Predložena hijerarhijska shema upravljanja osigurava potpunu kontrolu nad VFT-om. Štoviše, također se predlaže serijski dinamički kočioni otpornik (SDBR), SDBR je dodatni upravljivi uređaj za ograničenje širenja greške VFT sustavom, [4]. Detaljna hijerarhijska kontrola koja uključuje sve osnovne kontrole izvedena je u tri stupnja. U nastavku se raspravlja o praktičnom pristupu kod međusobnog povezivanja dvaju asinkronih elektroenergetskih sustava putem VFT-a. Stator stroja povezan je na električnu mrežu 1 (PG1), frekvencije  $f_1$  i faznog kuta  $\theta_{1,a}$ , a rotor je izravno spojen na električnu mrežu 2 (PG2), frekvencije  $f_2$  i faznog kuta  $\theta_2$ . Kod pokretanja asinkrono povezanih mreža, PG1 spaja se na stranu statora zatvaranjem strujnog prekidača odašiljačke strane, a u međuvremenu je sklopka primateljske strane otvorena. Tijekom tog trenutka treba izmjeriti frekvenciju  $f_m$  i fazi kut  $\theta_m$  napona inducirano na namotima rotora. Nakon toga treba izmjeriti frekvenciju  $f_2$  i fazni kut  $\theta_2$  napona PG2. U ovom dijelu, pogon istosmjernog motora koristi se za postizanje usklađenosti frekvencije i faznog kuta. Uzimajući sve uvjete u obzir za kontrolu VFT-a, istosmjerni motor je ugrađen na istoj osovinu kao i rotor može. Istosmjerni motor može se koristiti za efikasnu kontrolu upravljanja VFT-om. Znajući sve načine rada istosmjernog motora, kroz ovo poglavlje biti će opisani načini regulacije napona armature za upravljanjem istosmjernog motora. Takav način rada ispunjava sve zahtjeve regulacije i upravljanja istosmjernim strojem.



Slika 4.1. Konfiguracija VFT sustava [4]

## 4.1. Upravljanje VFT na razini sustava

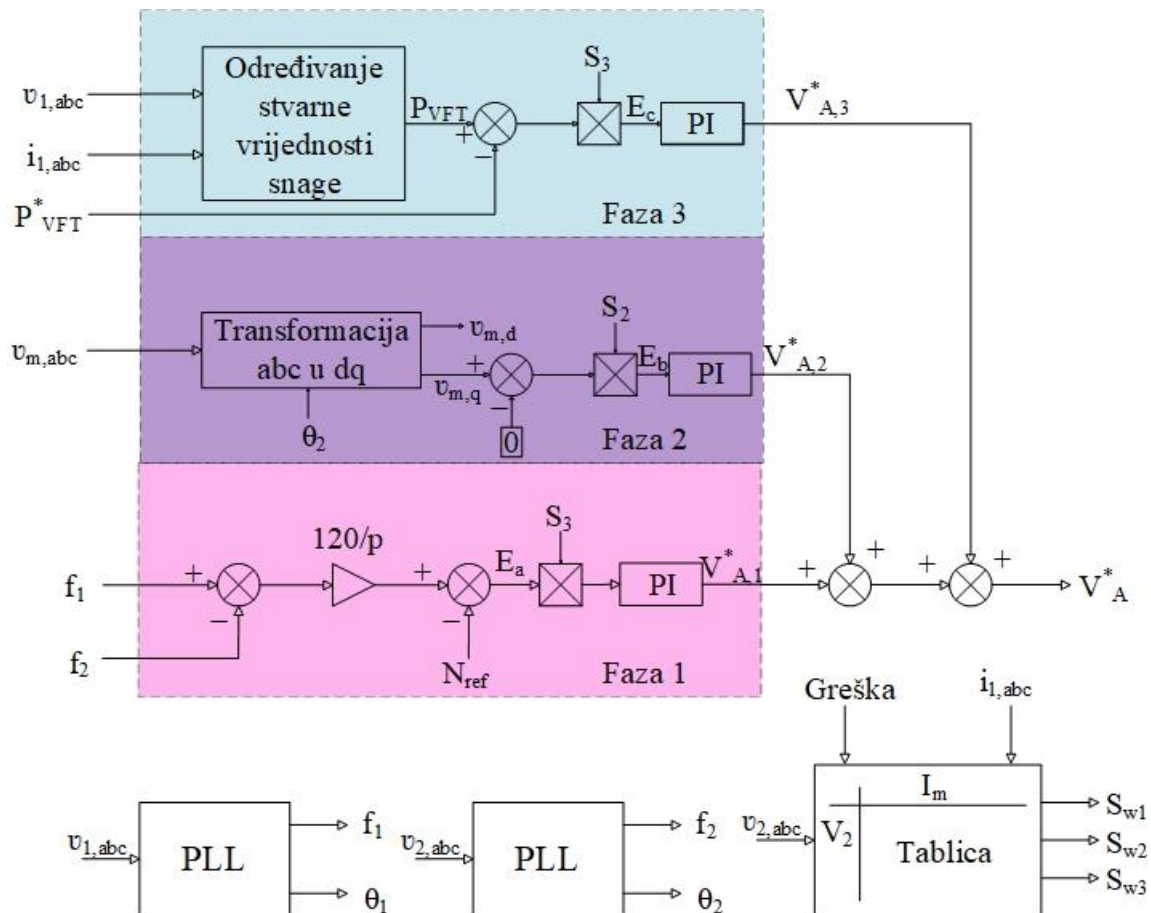
Za optimiziranje sustava koristi se VFT za regulaciju tokova snage sustava. U proračunu optimizacije protoka snage sustava, VFT se može smatrati kontrolnom varijablom u rješavanju jednadžbe optimalnog toka snage i optimizaciji toka snage sustava s drugim kontrolnim varijablama. Dispečeri koriste VFT kao osnovu za optimizaciju tokova snaga. U stvarnom sustavu, gubitak glavnih prijenosnih mreža može se pratiti i izračunati u stvarnom vremenu tijekom procesa regulacije snage prijenosa kako bi se osigurala optimalna strategija VFT nadziranja i upravljanja. I na taj način bi se ostvario cilj smanjenja gubitka sustava.

Modul frekvencije regulacijskog sustava koristi VFT za regulaciju električne frekvencije međusobno povezanih sustava. Naime, kontrolira razmjenu snage između dva sustava unutar dozvoljenog raspona VFT kapaciteta kako bi se maksimalno kontrolirala frekvencija sustava s obje strane unutar dozvoljenog raspona. Gubitak veza prijenosnog napajanja ili isključenjem elektrane može biti razlog za veliki poremećaj frekvencije. Na primjer, ako imamo dva povezana sustava. U normalnim uvjetima, sustav A prenosi snagu na sustav B, kada sustav B izgubi dio energije, frekvencija sustava B može biti manja, snaga koja se prenosi na sustav B putem VFT-a može se brzo povećati kako bi se kompenzirao nedostatak energije.

Niskofrekventne oscilacije su jedne od najutjecajnijih faktora koji utječu na sigurnost i na izmjeničnu međupovezanost velikih sustava. Kako bi se smanjio rizik od niskofrekventnih oscilacija koristi se VFT. Korištenjem VFT-a potiskuju se niskofrekventne oscilacije i regulira se snaga prijenosa VFT-a. Očito, ako su dva sustava povezana samo preko VFT-a, oscilacije snage se mogu smanjiti pomoću VFT signala za kontrolu snage. Međutim, ako postoje druge paralelne grane između dva povezana sustava, pogotovo izmjenična grana sa automatski uravnoteženim protokom snage, tok snage VFT-a i njegov izmjenični krug treba biti cilj upravljanja. Dinamičkim upravljanjem snage prijenosa VFT-a regulira se prigušenje sustava, takvim načinom učinkovito se potiskuju niskofrekventne oscilacije u sinkronom međusobno povezanom sustavu. Regulator prigušenja sličan je stabilizatoru koji se koristi u PSS sustavima. Takav sustav sastoji se od DC blokiranja, faznog voda i kompenzacijskih veza za fazni pomak. Njegov ulazni signal je zbroj prijenosnih snaga proučavanih dijelova, izlazni signal je porast kontrolne snage na VFT-u.

## 4.2. Predviđene strategije u hijerarhijskoj kontroli na razini elemenata VFT

Ovaj odjeljak opisuje cjelokupnu kontrolu VFT-a i serijski otpor dinamičkog kočenja (SDBR). Pogon istosmjernog motora jedini je uređaj kojim se može upravljati u VFT sustavu, [4]. SDBR je dodatni upravljivi uređaj za sprječavanje širenja greške. Cjelovita hijerarhijska strategija, sa svim kontrolama, predlaže se u tri faze. Kada je stator izravno spojen na PG1 i sklopka CB2 otvorena, pogon istosmjernog motora treba kontrolirati kako bi se postiglo usklađivanje frekvencije ( $f_r = f_m$ ) i usklađivanje faznog kuta ( $\theta_r = \theta_m$ ), [4]. Ovaj dio kontrole se ostvaruje u prva dva stupnja predviđene hijerarhijske kontrole. Nakon toga se uspostavlja veza između dvije elektroenergetske mreže preko VFT-a, a kontrola snage se provodi u trećem stupnju. Kontrolni blok dijagram na kojem su predstavljena tri stupnja hijerarhijske kontrole prikazan je na slici 4.2. Ciljevi i kontrola VFT-a u svakoj fazi hijerarhijske kontrole biti će opisani u sljedećim odlomcima.



Slika 4.2. Blok dijagram hijerarhijske kontrole [4]

### 4.2.1. Stupnjevi u hijerarhijskoj kontroli i kontrola greške pomoću SDBR

Hijerarhijska kontrola je podijeljena u tri stupnja: usklađivanje frekvencije, usklađivanje faznog kuta i usklađivanje prijenosa snage. Prvi stupanj je usklađivanje frekvencije. U početku kada je

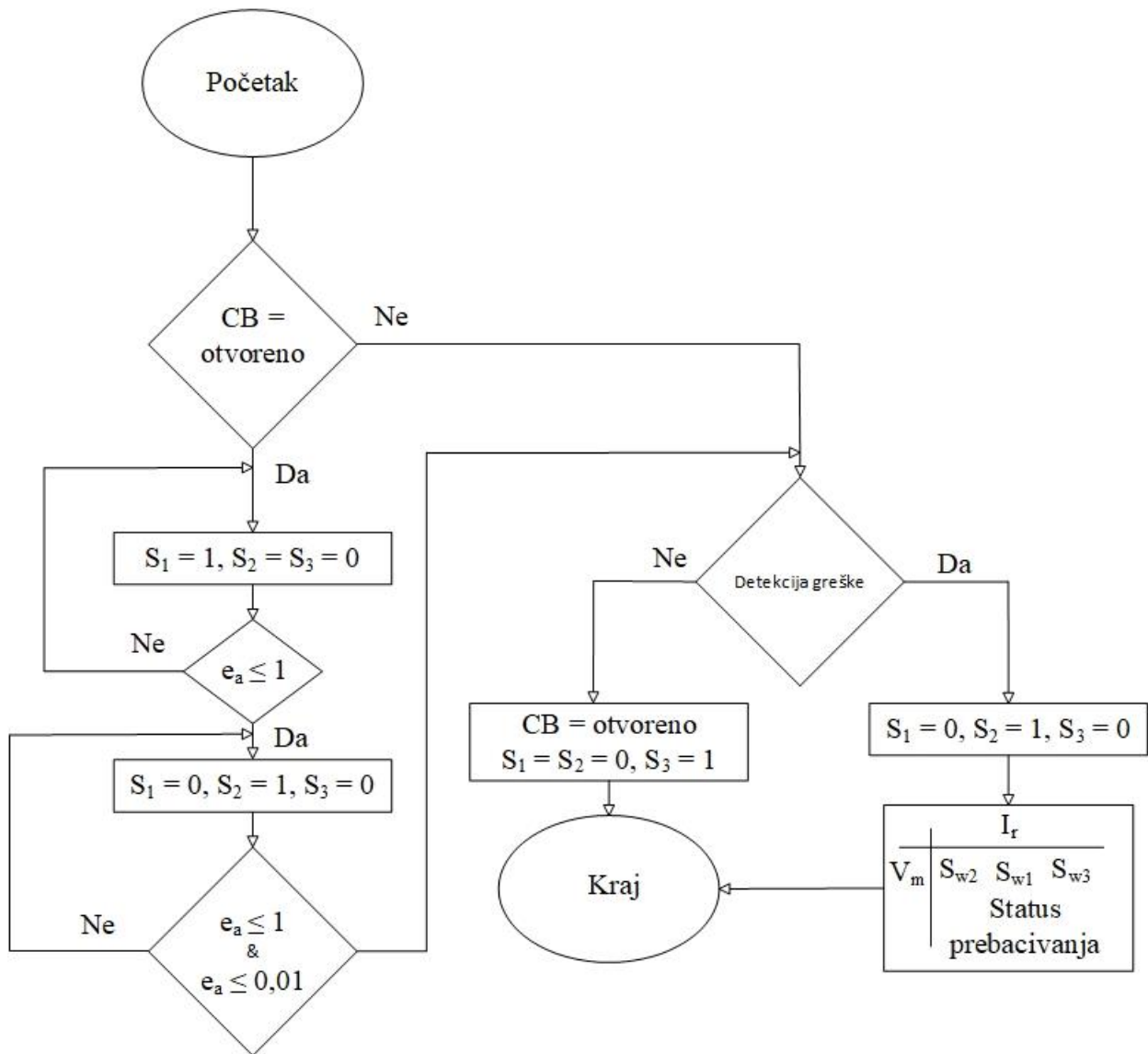
stator spojen na PG1, rotor je u stanju mirovanja, a sklopka je otvorena, izdaje se naredba S1=1 za pokretanje stupnja usklađivanja frekvencije, [9]. U tom slučaju, frekvencija induciranog napona rotora  $f_m$  treba se promijeniti s  $f_m = f_1$  na  $f_m = f_2$ . Da bi se postigla ova željena promjena frekvencije, ekvivalentna brzina rotora pri kojoj bi rotor VFT-a trebao biti pokretan pogonom istosmjernog motora je:

$$N_{ref}^* = \frac{120(f_1 - f_2)}{p} \quad (4-1)$$

Stoga se referentna veličina ( $N_{ref}^*$ ) i stvarna ( $N_{ref}$ ) brzina se uspoređuju i obrađuje preko PI regulatora za pokretanje potrebnog napona armature za napajanje istosmjernog motora. Stvarna brzina ( $N_{ref}$ ) mjere se jedna naspram druge pomoću komparatora i generira se odgovarajuća pogreška,  $E_a$  koja se dalje obrađuje u PI regulatoru za iniciranje potrebnog napona armature ( $V \cdot A, 1$ ) za napajanje istosmjernog motora, [4], [9]. Svaki put kada prosječna vrijednost pogreške čiste brzine ( $E_a$ ) padne ispod 1 okr/min, S1 prelazi na nisko stanje, a S2 na visoko, što uvodi sljedeću fazu kontrole.

Nakon usklađivanja frekvencije, sljedeći cilj je postići usklađivanje faznog kuta između  $v_{r,abc}$  i  $v_{m,abc}$  (tj.  $\theta_r = \theta_m$ ). Primjena abc-dq transformacije na izmjerene napone rotora ( $v_{m,abc}$ ) koristeći fazni kut ( $\theta_2$ ) napona PG2 ( $v_{2,abc}$ ), postignut kroz fazno zaključanu petlju (PLL), daje izravnu ( $v_{m,d}$ ) i kvadratnu ( $v_{m,q}$ ) komponentu napona induciranih rotorom koji se odnose na fazor napona PG2. Kako bi se implementirao ovaj uvjet, PI regulatorom se upravlja preko  $v_{m,q}$ , kako bi se proizveli potrebni naponi armature, [4], [9]. Kada prosječna vrijednost greške kuta,  $E_b$  padne ispod unaprijed postavljene margine, S2 padne nisko dopuštajući završetak faze 2. Nakon što se postigne podudaranje frekvencije i faznog kuta, dopušteno je zatvoriti kako bi se međusobno povezale dvije električne mreže preko VFT-a.

Prijenos djelatne snage ( $P_{VFT}$ ) od PG1 do PG2 dozvoljeno je mjeriti samo na strani statora motora i uspoređuje se s referentnom vrijednošću ( $P_{VFT}^*$ ), [9]. Pogreška  $E_c$  se propušta kroz PI kontroler za generiranje potrebnog napona armature i tako za kontrolu momenta koji razvija istosmjerni motorni pogon. Okretni moment proizveden istosmjernim motornim pogonom dinamički prilagođava kut kako bi se postigao željeni kut opterećenja.



**Slika 4.3.** Dijagram toka hijerarhijske kontrole i SDBR kontrole [4]

SDBR kontrola i otkrivanje grešaka integrirani su u hijerarhijsku strategiju upravljanja kao što je prikazano na slici 4.3. U slučaju kada dođe do kvara u mreži, kako bi se izbjeglo ubrzanje rotora, prijenos snage treba kontrolirati na vrijednosti prije kvara prisilnim  $S_3 = 0$  kako bi odgovarajući izlaz PI regulatora bio na vrijednosti prije greške, [4], [9]. Za prigušivanje oscilacija rotora izdaje se naredba  $S_1 = 1$  preko reguliranja momenta istosmjernog motora. U isto vrijeme, kombinacija otpornika u SDBR je napravljena kako bi se ograničilo širenje kvara. Ovakav tip kontrole provodi se uz pomoć dvodimenzionalne tablice koja je funkcija struje i napona greške. Izlaz tablice pretraživanja definira stanje sklopki  $S_{w1}$ ,  $S_{w2}$ ,  $S_{w3}$  što omogućuje odabir odgovarajuće kombinacije različitih otpornika. Nakon uklanjanja kvara, regulator prijenosa snage se ponovno aktivira kako bi održao kontrolu prijenosa snage davanjem upravljačkih signala  $S_1 = S_2 = 0$ ,  $S_3 = 1$ .

### 4.3. Elementi i osnovne jednadžbe istosmjernog pogonskog sustava VFT

Pogonski sustav istosmjernog motora važan je funkcionalni dio VFT-a. Za istosmjerni napon armature koristi se šesto-mosni ispravljač. U osnovi kontrolira se kut okidanja i tako se kontrolira izlazni napon ispravljačkog kruga. Osim toga, na taj način se kontrolira izlazni moment istosmjernog motora i ostvaruje kontrolu brzine rotora. Na slici 3.4. je prikazana shema DC pogonskog kruga. Osnovni dijelovi DC pogonskog kruga uključuju: transformator, šesto-mosni ispravljač, filter kondenzator, prekidač za promjenu smjera, tiristorski okidač i istosmjerni motor. Transformator služi za spuštanje visokog napona na niski napon koji dalje ide do šesto-mosnog ispravljača. Za ispravljanje izmjeničnog napona koristi se šesto-mosni ispravljač koji ima mogućnost promjene amplitude izlaznog napona. Kondenzator služi za filtriranje izlaznog napona. Tiristorski okidač služi za generiranje impulsa za kontrolu vodljivosti okidača tiristora ispravljača i GTO vodljivosti komutatora. Na kraju je DC motor kojem izlazni moment kontroliramo veličinom armaturnog napona.

Osnovni princip rada je napajanjem iz električne mreže preko step-down transformatora, zatim ispravljanje putem šesto-mosnog ispravljača, filtriranje pomoću kondenzatora i pomoćnog uređaja kako bi se dobila regulirana amplituda i polaritet koji se može obrnuti, [1]. Ispravljački izlazni napon VFT-a će djelovati na armaturu namota DC pogonskog motora dok okidački impuls ispravljača osigurava upravljački modul okidačkog impulsa.

Na temelju osnovnih jednadžbi ispravljačkog kruga, izlazni napon je, [31]:

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha-60^\circ}^{\alpha} \sqrt{3} U_m \cos(\theta + 30^\circ) d\theta - \frac{3X_r}{\pi} I_d = 1.35 U_{LL} \cos \alpha - \frac{3X_r}{\pi} I_d \quad (4-2)$$

Gdje su:

$U_d$  – prosječna vrijednost izlaznog istosmjernog napona, kV;

$U_m$  – vršna vrijednost izmjeničnog napona, kV;

$U_{LL}$  - efektivna vrijednost izmjeničnog napona, kV;

$\alpha$  – kut okidanja ispravljača, (°);

$X_r$  – reaktancija,  $\Omega$ ;

$I_d$  – istosmjerna struja, kA;

Odnos između izmjenične struje i istosmjerne struje pretvarača je:

$$I_L = \frac{I_{LM}}{\sqrt{2}} = 0.78I_d \quad (4-3)$$

Gdje su:

$I_{LM}$  – vršna vrijednost izmjenične struje, kA;

$I_d$  – istosmjerna struja, kA;

$I_L$  – efektivna vrijednost izmjenične struje, kA;

Ako zanemarimo gubitke, jednadžba aktivne snage je:

$$\begin{aligned} P_d &= U_d I_d \\ P_{ac} &= 3U_{LN} I_{L1} \cos \alpha \\ P_d &= P_{ac} \end{aligned} \quad (4-4)$$

Gdje su:

$P_{ac}$  – snaga na AC strani, MW;

$P_d$  – snaga na DC strani, MW;

Jednadžbe u krugu istosmjernog motora:

$$\begin{aligned} E_a &= C_e \Phi n \\ T_d &= C_T \Phi I_d \\ U_d &= E_a + R_a I_d \\ P_m &= \Omega T_d = E_a I_d \end{aligned} \quad (4-5)$$

Gdje su:

$E_a$  – elektromotorna sila inducirana u armaturi, kV;

$T_d$  – elektromagnetski moment, kN\*m;

$P_m$  – elektromagnetska snaga, kW;

$\Phi$  – magnetski tok, Wb;



$C_e$  – elektromagnetska konstanta;

$C_T$  – konstanta momenta;

$R_a$  – otpor armature,  $\Omega$ ;

$n$  – brzina vrtnje rotora, r/min;

$\Omega$  – mehanička kutna brzina rotora, rad/min;

Iz jednadžbe (4-1) i (4-5) može se vidjeti da

$$\begin{aligned} T_d &= C_T \Phi (U_d - E_a) / R_a \\ &= C_T \Phi (U_d - C_e \Phi n) / R_a \\ &= C_T \Phi (1.35 U_{LL} \cos \alpha - \frac{3X_r}{\pi} I_d - C_e \Phi n) / R_a \end{aligned} \quad (4-6)$$

Kako je normalna brzina  $n$  VFT-a vrlo mala, reakcija armature u odnosu na promjenu  $\Phi$  može se zanemariti. Kada je frekvencija sustava s obje strane jednaka, brzina  $n$  je nula u stacionarnom stanju i u ovoj je točki  $T_d$  je proporcionalan  $\cos \alpha$ , [1]. Mogu se zanemariti gubici u namotu rotora.

$$P_s = 2\pi f_s T_d = 2\pi f_s C_T \Phi (1.35 U_{LL} \cos \alpha - \frac{3X_r}{\pi} I_d - C_e \Phi n) / R_a \quad (4-7)$$

Iz jednadžbe 4-7 vidi se kada je frekvencija konstantna sa obje strane VFT-a, može se zanemariti utjecaj reaktancije  $X_r$ . Kada je brzina rotora konstantna vidi se da je snaga prijenosa  $P_s$  proporcionalna  $\cos \alpha$ . Ukratko, promjenom kuta ispravljača  $\alpha$ , izlazni moment istosmjernog motora može se promijeniti tako da se kontrolira stanje kretanja rotora VFT-a. Osim toga, kontrolira se veličina i smjer prijenosne snage VFT-a, time se ostvaruju različiti ciljevi upravljanja VFT-om. Međutim, kada se u obzir uzme reaktancija  $X_r$ , odnos između  $P_s$  i  $\cos \alpha$  nije više linearan. Također se iz jednadžbe može zaključiti kada je  $P_s$  nula tada je i  $T_d$  nula. Za brzinu  $n$  dano je odstupanje:

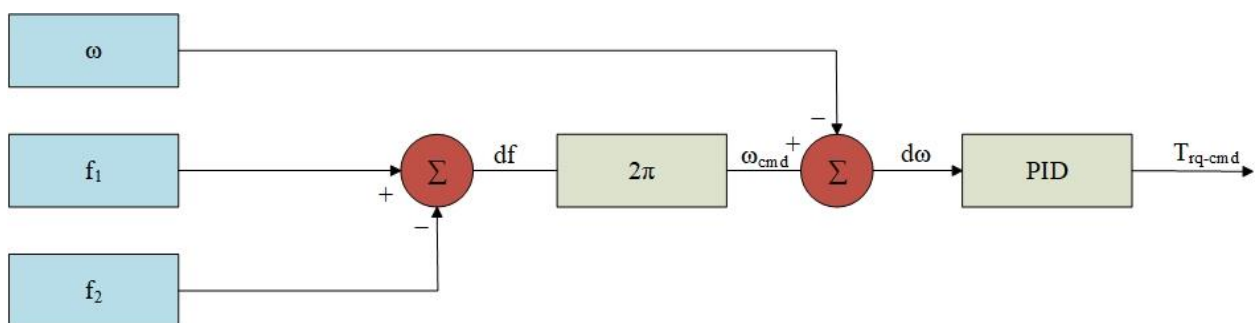
$$\begin{aligned} 1.35 U_{LL} \cos \alpha &= C_e \Phi n + \frac{3X_r}{\pi} I_d \\ \cos \alpha &= (C_e \Phi n + \frac{3X_r}{\pi} I_d) / 1.35 U_{LL} \end{aligned} \quad (4-8)$$

Jednadžba (4-8) može se koristiti za kontrolu rada VFT-a koji je prije priključen na mreže.

Upravljanje okidačem i karakteristike ispravljačkog kruga su vrlo bitne. Kao što je prije navedeno, osnovni zadatak istosmjernog sustava je kontrolirati kut okidanja, zbog toga se mijenja napon armature i regulira izlazni moment i brzina istosmjernog motora. Kut upravljanje je rasponu od  $0^\circ$  do  $120^\circ$ . Kada je kut  $0^\circ$  izlazni napon je maksimalan, kada je kut okidača  $120^\circ$  izlazni napon je 0. Amplituda kuta ispravljača predstavlja fazu okidanja.

#### 4.4. Koncept upravljanja VFT na razini uređaja

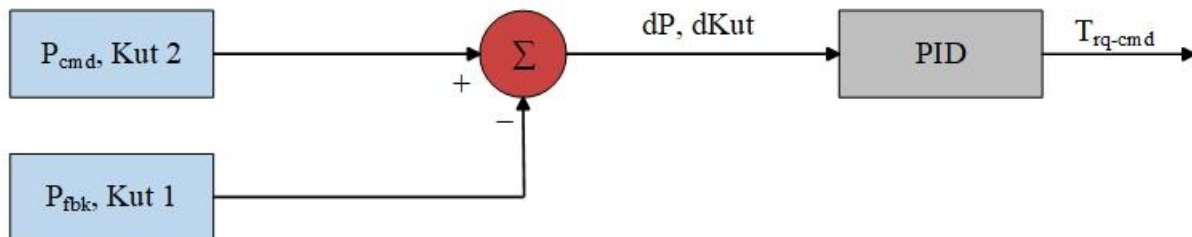
Promjenom brzine rotora mijenja se moment istosmjernog motora, na taj način kontrolira frekvenciju rotacijskog transformatora kako bi se osiguralo  $f_s = f_r + f_{rm}$ , što je osnova za postizanje stabilnog rada VFT-a. Prije povezivanja VFT-a sa mrežom, moment rotora se uglavnom regulira kako bi se električna frekvencija rotacije rotacijskog transformatora održala jednaka frekvencijskoj razlici između sustava s obje strane VFT-a. Kada spojimo VFT sa sustavom kroz namot teče struja, izlazni moment istosmjernog motora, elektromagnetski moment namota rotora i statora utječe na brzinu vrtnje rotora. Ovaj proces se koristi za održavanje stabilnosti brzine vrtnje rotora. Kako bi smanjili utjecaj smetnji, frekvencija se mjeri na obje strane VFT-a. Mjerenjem frekvencijske razlike između rotora i statora, izračunava se elektromagnetski moment potreban za realizaciju regulacije brzine putem PID-a. Frekvencije  $f_1$  i  $f_2$  su frekvencije mreža s obje strane;  $df$  je razlika frekvencija između mreža s obje strane;  $\omega$  je kutna brzina rotora;  $\omega_{cmd}$  je zadana kutna brzina i uspoređuje se s izmjerenom brzinom rotora  $\omega$ , kako bi se dobio pomak  $d\omega$ ; i nakon toga se računa potrebni elektromagnetski moment preko PID-a. Blok dijagram za upravljanje brzinom vrtnje rotora prikazan je na slici 4.4.



**Slika 4.4.** Blok dijagram za upravljanje brzinom rotora

Aktivna kontrola snage koristi za regulaciju snage prijenosa VFT-a, što je osnova svih vrsta kontrole sustava. Tek povezivanjem VFT-a sa sustavom kontrola aktivne snage postaje djelotvorna. U teoriji, aktivna snaga VFT-a i elektromagnetski moment istosmjernog motora su proporcionalni. U praksi, postoje razlike između zadane  $P_{cmd}$  i stvarne snage  $P_{fbk}$ , to odstupanje

snage  $dP$  koristimo za dobivanje elektromagnetskog momenta kao kontrolne veličine pomoću PID-a, [1].



**Slika 4.5.** Blok dijagram za upravljanje prijenosa aktivne snage i faznog kuta

Kontrola faznog kuta napona uključuje dvije funkcije. Prvi način je kontrolirati fazni kut na obje strane sinkronizirajuće sklopke prije integracije VFT-a. Drugi način je kontrolirati fazni pomak napona VFT-a između rotora i statora. Takav način se koristi i za kontrolu snage. U stvarnim proračunima mjerit će se fazni kut napona sabirnica s obje strane. Rotorom se upravlja kako bi se razlika između faza napona približila nuli s obje strane. Elektromagnetski moment se izračunava se putem PID-a i šalje upravljačkom sustavu za regulaciju brzine i položaja VFT-a. Blok dijagram za kontrolu faznog kuta napona je isti kao i blok dijagram za upravljanje aktivne snage, samo što na je na ulazu fazni kut.

Sinkrona kontrola mrežnog povezivanja omogućuje realizaciju mrežnog rada VFT-a kada su ispunjeni uvjeti kontrole mrežnog povezivanja. Kod povezivanja mreže preko VFT-a, postoji mala razlika u povezivanju nego kod klasičnih povezivanja mreža. Prednost VFT-a je zato što može automatski regulirati fazni kut kako bi se prilagodio zahtjevima povezivanja. Kada postoji razlika u frekvencijama i faznom kutu između napona na obje strane sustava, VFT ispunjava uvjete spajanja na mrežu.

Ovo kontrolira ravnotežu jalove snage i razine napona sabirnice u sustavu prebacivanjem paralelnih kondenzatorskih baterija ili ograničavanjem prijenosne snage VFT-a. Kada struja teče kroz VFT, reaktancija VFT-a i reaktancija step-down transformatora će apsorbirati jalove snage i zbog toga može doći do pada napona. Zbog snage koju apsorbira VFT se spaja paralelno sa kondenzatorskom baterijom. Kondenzatorska baterija ima tri načina rada. Prvi način je način ravnoteže. Izračunati jalovu snagu koju proizvodi VFT na temelju struje VFT-a i spojiti kondenzatorske baterije prema određenom rasporedu kako bi jalova snaga bila što bliže jalovoj snazi koju proizvodi serijska reaktancija propuštanja. Drugi način rada je naponski način. U ovom načinu je cilj kontroliranje napona na sabirnicama, odnosno kontroliranje napona u određenom

rasponu stupnjevitim prebacivanjem kondenzatorskih baterija. Kada je napon sabirnice niži od određene amplitude, uključiti baterije kondenzatora i obrnuto. Kada je napon viši, potrebno je isključiti kondenzatorske baterije. Zadnji mod je ručni mod. Dispečer kontrolira napon i upravlja kompenzacijom na temelju uvjeta u sustavu. Kada su svi kondenzatori pušteni u rad, a razina napona je još uvijek niža od dopuštene vrijednosti, prijenosnu snagu VFT-a potrebno je dodatno regulirati kako bi se održao napon sustava.

## 5. Analiza pogonskih i ekonomskih karakteristika

### 5.1. Pogonske karakteristike

U ovom odjeljku prvo su opisani glavni VFT parametri koji se koriste na temelju primjene kao tehnologije, VFT parametre koji se koriste razvio je GE i koriste se kao referencu. Brzi razvoj informatike i tehnologije simulacije doprinijeli su razvoju istraživanja elektroenergetskog sustava i ubrzali su učinkovitost novih tehnoloških istraživanja. Razvoj novih tehnologija i novih uređaja u suvremenim elektroenergetskim sustavima bazira se na digitalnoj simulaciji umjesto na razvoju fizičkih prototipa. Simulacijom se smanjuju troškovi, vrijeme i nema ograničenja kao kod fizičkog prototipa. Korištenje digitalne simulacije za proučavanje i analizu performansi i karakteristika nove opreme postavlja temelj za razvoj i primjenu novih tehnologija i opreme. Kod provođenje digitalnog modeliranja elektroenergetskih sustava sa VFT-om u različitim nivoima za simulaciju i izračunavanje radnih karakteristika u različitim radnim uvjetima i različitim kvarovima u sustavu, za provjeru racionalnosti modela i upravljačkih sustava, simulirati i analizirati različite funkcije VFT-a. Osim toga, mogu se dodatno demonstrirati funkcije i prednosti VFT-a u međusobnom povezivanju.

Odabir parametara opreme i tehničkih specifikacija važan je dio projektiranja elektroenergetskog sustava. Kako bi analizirali VFT opremu, treba odabrati parametre na temelju zahtjeva sustava i mogućnosti opreme. Glavni parametri su osnovne električne veličine kao što su nazivni napon, nazivni kapacitet i reaktancija pobude. Osim električnih parametara tu ulaze i mehaničke veličine kao što su moment inercije i prigušenje. Istovremeno treba opisati parametre pomoćne opreme koji se koriste u VFT sustavu: kondenzatorske baterije, step-down transformator, ispravljački krug i DC motor.

Nazivni kapacitet VFT-a ograničen je izvedbom izolacijom rotacijskog transformatora, koji se odnosi na nazivni napon i strujne amplitude na četkicama kolektora. VFT koji je proizveo GE ima snagu od 105 MVA. Stručnjaci iz GE koji su radili na izradi VFT-a nalažu da će snaga doseći vrijednosti 200-300 MW. Uzimajući u obzir stvarnu situaciju energetske mreže u Kini, snaga jednog VFT-a općenito se smatra 200 MW. Naravno, paralelnim pogonom više VFT-ova povećava se kapacitet stvarnih potreba za prijenosom energije.

Nazivni napon je linijski napon VFT-a. Kod određenog kapaciteta, što je veći nazivni napon, to je manja nazivna struja i to je povoljnije za dizajn četkica, ali to dovodi do viših zahtjeva za dizajn izolacije rotirajućih dijelova. Trenutno nazivni napon iznosi 17 kV, koji je proizveden od strane

GE. Uzimajući u obzir napon postojećih hidrogeneratora, nazivni napon može doseći vrijednosti 20 kV uzimajući četkice u obzir. Smatra se da je omjer zavoja namota statora i zavoja namota rotora 1:1.

Nakon što su definirani nazivni snaga i napon, na red dolaze parametri kondenzatorske baterije i step-down transformatora. VFT i step-down transformator imaju reaktanciju, koja apsorbira jalovu snagu kada kroz njih teče struja. Kada je potrebno, mogu se koristiti i shunt kondenzatori. Pretpostavimo da kondenzatori kompenziraju sav gubitak jalove snage VFT kruga pri nazivnoj snazi, nazivni napon je 20 kV, a kapacitet je  $3 \times 30$  MVAr. Step-down transformator ima nazivni kapacitet 210 MVA, normalno snaga ovisi o prilikama primjene. Omjer transformacije je 230:20 ili 525:20, impedancija kratkog spoja je 10%; a ima ukupno dvije grupe.

DC motor osigurava zakretni moment za rotor u VFT-u, uglavnom povezan s razlikom frekvencija između sustava s obje strane VFT-a. Kada je frekvencija jednaka sa obje strane VFT-a, 50 Hz ili 60 Hz, frekvencijska razlika sustava na obje strane VFT-a smatra se 1 Hz s marginom od 10%. Koristeći konfiguracijski kapacitet istosmjernog motora prvog VFT-a koji je proizveo GE, nazivna snaga istosmjernog motora je 5 MW.

Parametri ispravljačkog su vrlo važni kod projektiranja VFT sustava. Nazivna snaga komponenti za ispravljanje se uzima u obzir na temelju nazivne snage istosmjernog motora s marginom od 10%, odnosno 5,5 MW. Omjer transformacije nazivnog napona ispravljačkog transformatora je 20:4; istosmjerni izlazni napon je 5 kV; napon na niskonaponskoj strani step-down transformatora je 4 kV,[1].

## 5.2. Ekonomske karakteristike VFT

Ulažu se naponi kako bi se poboljšala ekonomska korist i pouzdanost opskrbe električnom energijom kroz međusobno povezivanje. Stoga se aktivno provode istraživanja o vrsti tehnologije za povezivanje elektroenergetskih sustava. U odabiru sustava mrežnog povezivanja uzimaju se u obzir karakteristike sustava, pouzdanost, ekonomska učinkovitost i geografski položaj, među kojima veliki udio ima ekonomska analiza. Zbog toga je provedena ekonomska analiza koja daje ekonomsku ocjenu obzirom na različite vrste tehnologije za povezivanje mreža. Ekonomska analiza temeljila se na investicijskom trošku metode spajanja VFT i HVDC tehnologije na temelju uspostavljanja sustava povezivanja na osnovu kapaciteta, a uspoređeni su troškovi pretvaračke stanice i VFT stanice uključujući uređaj za pretvorbu snage.

Ekonomska procjena VFT-a za međusobno povezivanje asinkronih mreža prikazana je u tablicama 5.1.-5.4. VFT sustav zahtjeva stanicu koja uključuje rotacijski transformator koji se postavlja između dva različita ustava, potrebni su transformatori za podešavanje napona između sustava i dva prekidača po uređaju.

Ovisno o nazivnoj snazi, cijena željezne jezgre i namota uvelike utječe na cijenu transformatora. Investicijski trošak za transformator se može izračunati kao što je prikazano u tablici 5.1.

**Tablica 5.1.** Troškovi investicije prema nazivnoj snazi transformatora u milijunima eura [3]

| Sn (MVA)                   | 200  | 300  | 400  | 630  | 722  | 900  |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|
| C <sub>trans</sub> (mil.€) | 2,30 | 3,14 | 3,88 | 5,46 | 6,04 | 6,52 |

$$C_{trans} = 0.0459 * P^{0.7513} \quad (5-1)$$

Gdje je C<sub>trans</sub> procijenjeni trošak, a P je prijenosna snaga (MW). Informacije o troškovima VFT-a nisu objavljeni, procjenjuju se da su ekvivalentni dvostruko napajanom generatoru (DFIG) koji se koriste u vjetroturbinama, a za istosmjerne motore potrebne za upravljanje predviđa se 30 % cijene DFIG-a iste snage. Investicijski trošak za 5 MW DFIG procjenjuje se na 482.668,17 € i to pod pretpostavkom da je trošak razmjeran snazi, investicijski troškovi VFT-a prikazani su u tablici 5.2. u milijunima eura, [3].

**Tablica 5.2.** Investicijski troškovi prema prijenosnom kapacitetu VFT-a u milijunima eura [3]

| P (MW)                  | 300   | 600   | 900    |
|-------------------------|-------|-------|--------|
| Troškovi VFT-a (mil. €) | 37,65 | 75,30 | 112,95 |

Trošak prekidača ovisi o nazivnom naponu, pa se može izračunati u odnosu na njega. Taj odnos se vidi u tablici 5.3. Formula za trošak prekidača može se definirati kao jednadžba.

**Tablica 5.3.** Troškovi ulaganja temeljeni na nazivnom naponu prekidača [3]

| Un (kV)           | 33   | 132   | 220  | 400  |
|-------------------|------|-------|------|------|
| Troškovi (mil. €) | 0,07 | 0,160 | 0,24 | 0,39 |

$$C_{(cd)ac} = 0.0009V + 0.0469 \quad (5-2)$$

U formuli  $C_{(cd)ac}$  je procijenjeni investicijski troškovi, a  $V$  je nazivni napon u kilovoltima. Na kraju su analizirani svi investicijski troškovi VFT sustava. Ekonomska isplativost VFT-a je analizirana na temelju uvođenja transformator za izmjenični prijenos i VFT stanice snage 300 MW, 600 MW, 900 MW između dvije međusobno povezane asinkrone mreže. Ugrađen je po jedan transformator na prijemu i odašiljanju, a VFT stanica između mreža ima dva prekidača. Na temelju navedenih pretpostavki, procijenjeni su investicijski troškovi svakog VFT sustava. U tablici 5.4. prikazani su investicijski troškovi prema kapacitetu VFT-a u milijunima eura.

**Tablica 5.4.** Ukupni investicijski troškovi VFT u milijunima eura [3]

| P (MW)                  | 300   | 600   | 900    |
|-------------------------|-------|-------|--------|
| Troškovi VFT-a          | 37,65 | 75,30 | 112,95 |
| Troškovi transformatora | 6,25  | 10,51 | 14,26  |
| Troškovi prekidača      | -     | 1,42  | -      |

### 5.3. Usporedba troškova VFT i HVDC tehnologije

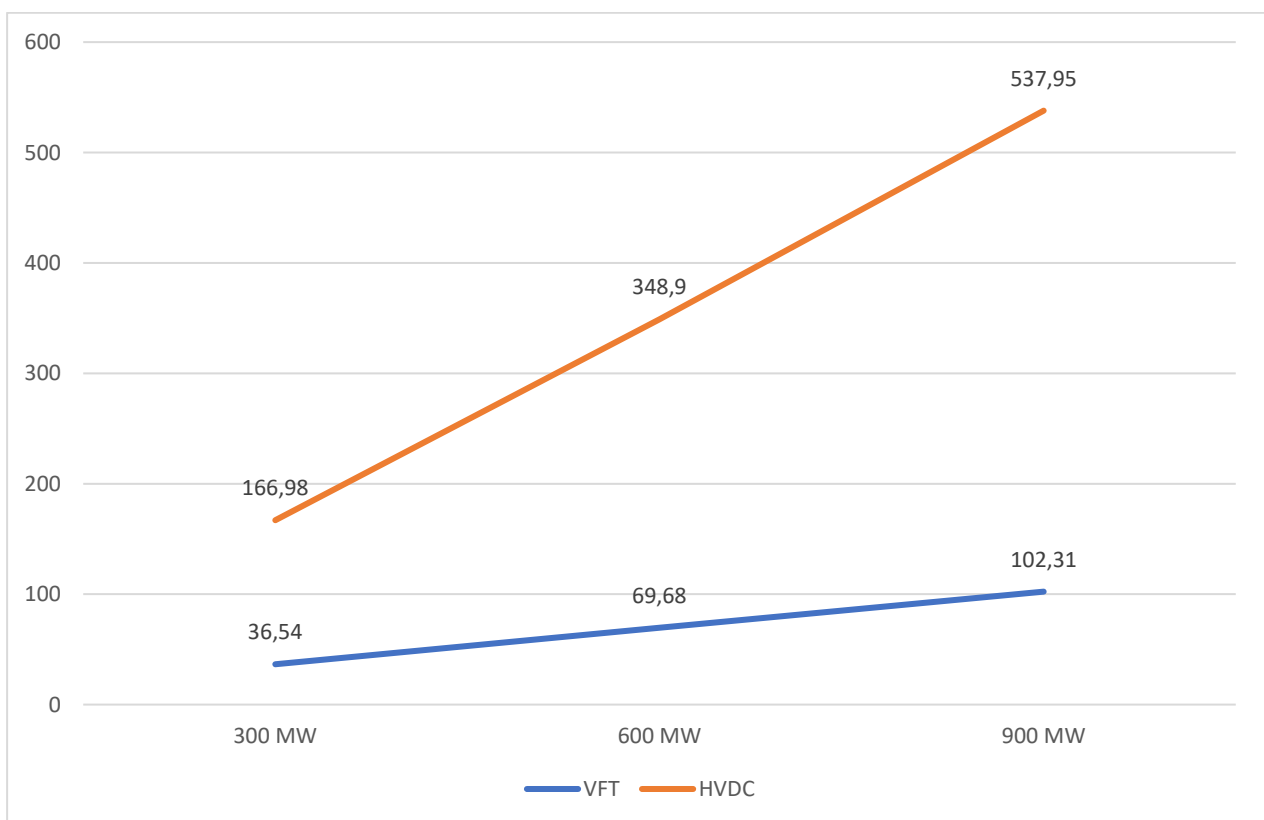
U ovom dijelu je opisana i uspoređena ekonomska procjena između VFT i HVDC tehnologije. U tablici 5.5 prikazane su investicije prema nazivnoj snazi obje tehnologije. Kao što se može vidjeti na grafu, VFT je isplativiji u smislu troškova opreme u usporedbi s HVDC. Ekonomska analiza također potvrđuje da VFT tehnologija s istim performansama zahtijeva oko 70% manje



investicijskih troškova u usporedbi s HVDC tehnologijom. Osim toga, iz grafa se vidi kako troškovi rastu i povećanjem kapaciteta snage.

**Tablica 5.5.** Investicijski troškovi prema kapacitetu obje tehnologije izraženi u milijunima eurima [3]

| Snaga trošila | VFT    | HVDC   |
|---------------|--------|--------|
| 300 MW        | 36,54  | 166,98 |
| 600 MW        | 69,68  | 348,90 |
| 900 MW        | 102,31 | 537,95 |



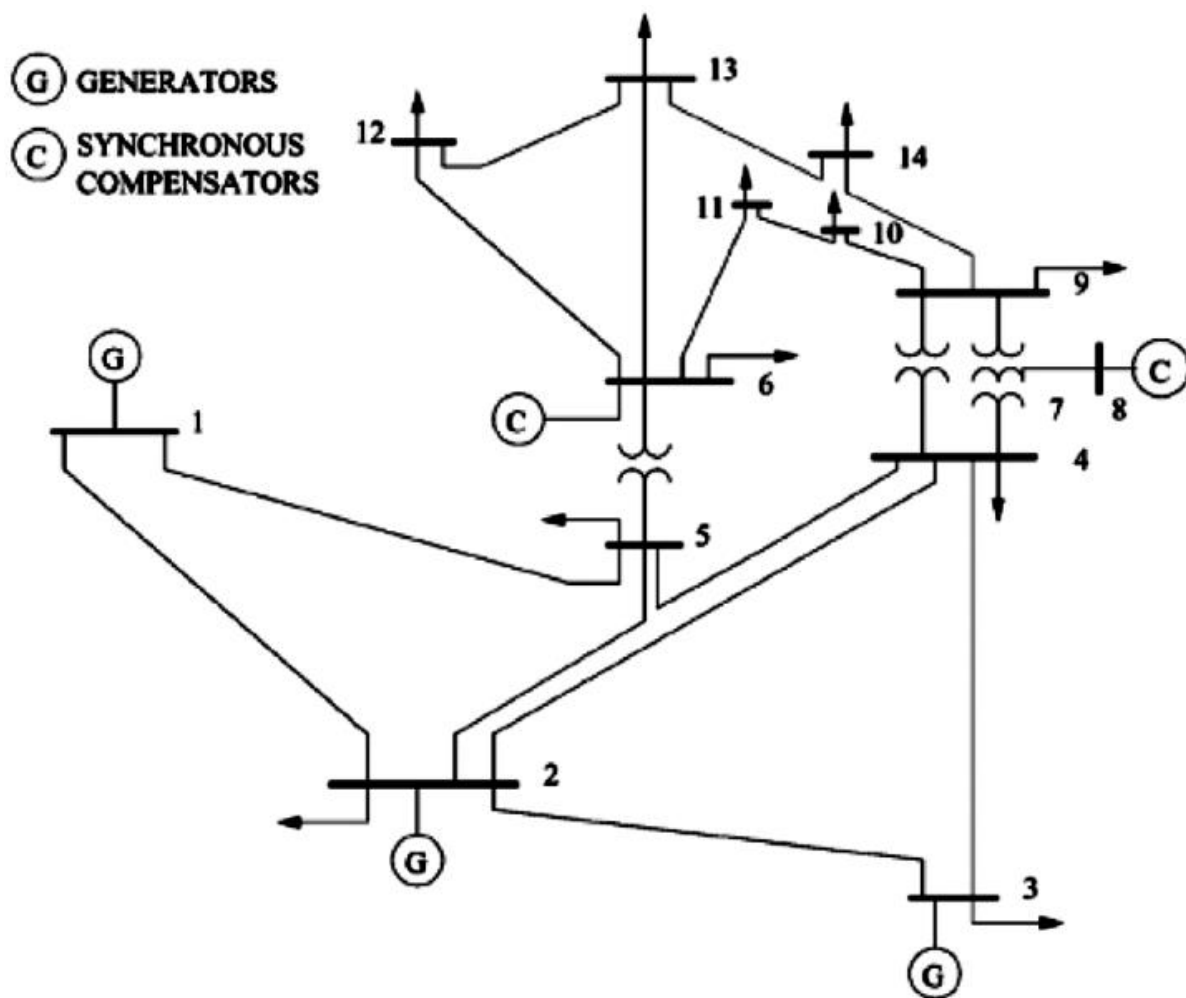
**Slika 5.6.** Troškovi ulaganja prema kapacitetu (u milijunima eura)

HVDC se uglavnom koristi za različite mrežne priključke u skladu sa svojim prednostima, ali postoji nekoliko problema, kao što su visokofrekventni harmonici, cijena uređaja za pretvorbu energije i stanice te istosmjerni prekidači. S druge strane, VFT je veoma jeftino rješenje i baziran je na dobro razvijenoj izmjeničnoj tehnologiji. Još jedan plus kod VFT tehnologije, je taj što nema generiranja harmonika zbog rotirajućeg uređaja. Kroz ovaj odjeljak je prikazana ekonomska

analiza VFT i HVDC tehnologije za međusobno asinkrono povezivanje asinkronih energetskih mreža, a VFT ima bolju ekonomičnost za iste performanse kao HVDC, [3].

## 6. Model Varijabilnog frekvencijskog transformatora u *DigSilent* programu

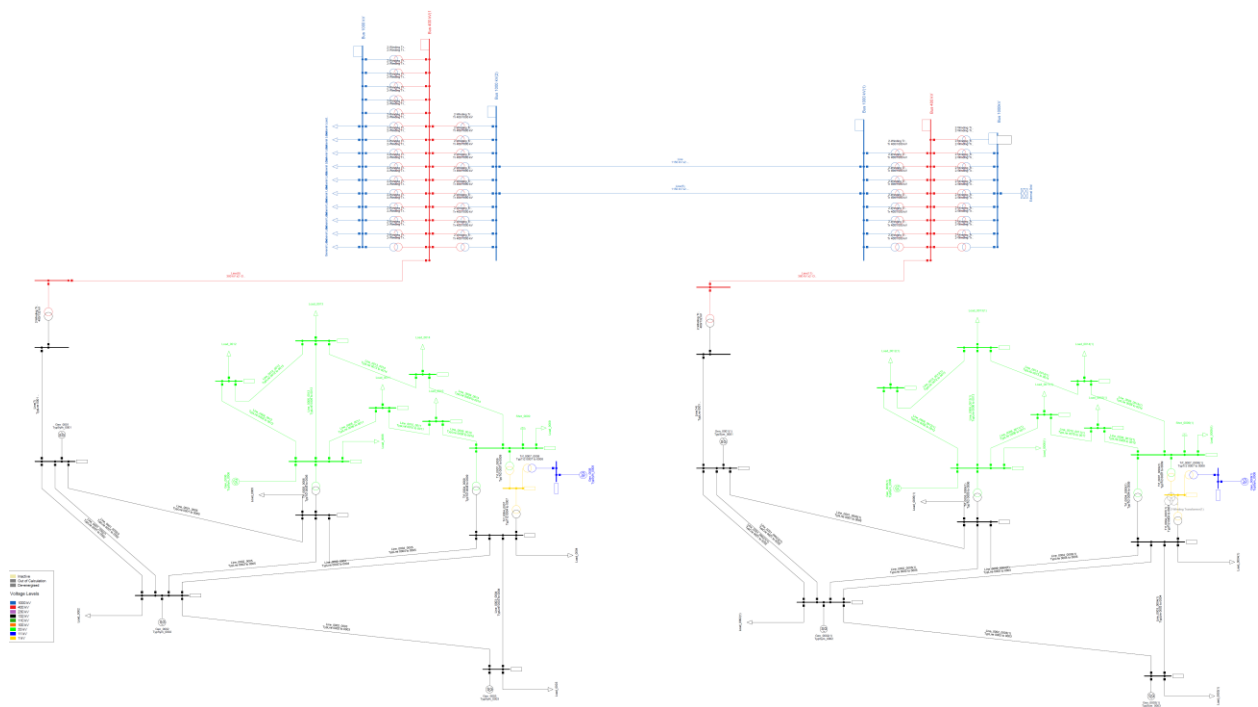
U prethodnim poglavljima su opisane različite implementacije VFT uređaja koji se mogu spajati na različite sustave i na različite naponske razine. Ovo poglavlje rada će se usmjeriti na realni elektroenergetski sustav, odnosno na realnu mrežu u programu DIgSILENT PowerFactory 2022. Za potrebe ovog diplomskog rada analizirat će se 14 Bus New System, 14-sabirnički sustav. Promatrani slučaj IEEE 14 bus predstavlja jednostavnu aproksimaciju američkog sustava od 1962. godine. Ovaj sustav se naveliko koristi za promatranje stabilnosti elektroenergetskih sustava. IEEE 14-sabirnički sustav je visokonaponski sustav, koji se sastoji od 14 sabirnica, 11 potrošača i 5 generatora koji su međusobno povezani preko trofaznih transformatora. Slika 6.1 prikazuje jednopolnu shemu 14-sabirnički sustav. Za proračun tokova snaga DIgSILENT koristi Newton-Raphsonov iterativni postupak. Newton-Raphsonova metoda je najčešće korištena metoda za proračun tokova snaga u mreži zbog svoje konvergentnosti i razmjerno velike brzine rješavanja.



Slika 6.1. Jednopolna shema IEEE 14 Bus System [11]

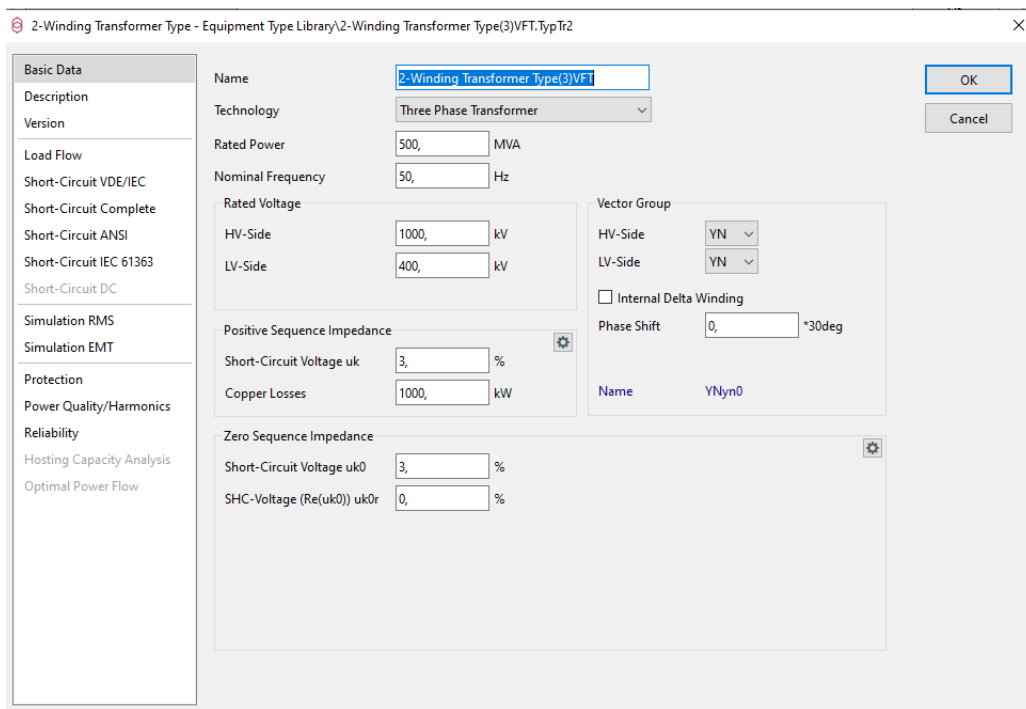
## 6.1. Povezivanje dva IEEE 14-sabirnička sustava preko VFT

Povezivanjem dva IEEE 14-sabirnička sustava preko VFT sustava. VFT sustav se simulira pomoću transformatora 2-Winding Transformer Type 1000/400kV (300 MVA), 2-Winding Transformer Type(3)VFT 400/1000 kV (500 MVA), dva voda 1150 kV x2 -Tannenbaum-6xAl/Če 680/85 duljine 1000 km koji povezuje dvije 1000 kV sabirnice i trošila 2000 MW i 300 MVar. Na 2-Winding Transformer Type(3)VFT 400/1000 kV (500 MVA) gubici u bakru su 1000 kW. VFT se simulira pomoću faznih transformatora. Vanjska mreža (External Grid) ima snagu od 2000 MW. Dva IEEE 14-sabirnička sustava su povezana preko VFT sustava i to na preko sabirnica 1000 kV. Nakon povezivanja i modeliranja komponenti, pokrenuta je analiza tokova snaga. Testirati će se VFT utjecaj na napon i tok djelatne i jalove snage na sabirnicama i vodovima na naponskoj razini 1000 kV. Primjer takvog sustava prikazan je na slici 6.2.

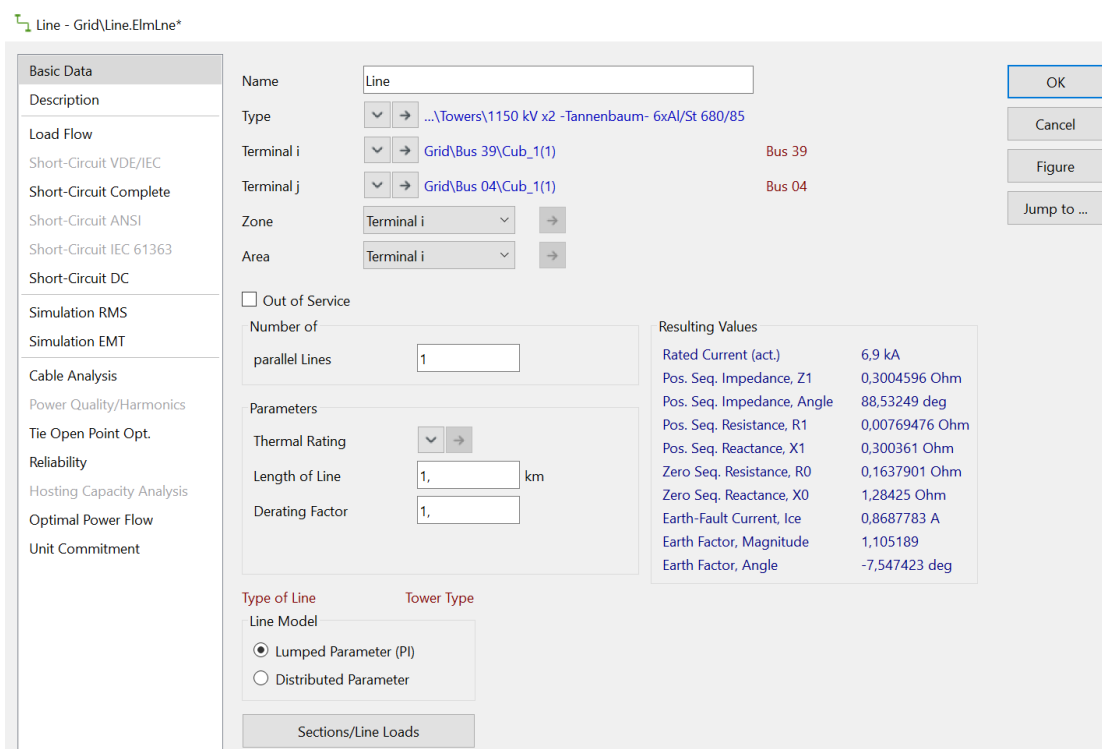


**Slika 6.2.** Jednopolna shema IEEE 14 Bus System i VFT sustava iz programa DIgSILENT





**Slika 6.4.** Nazivni podaci varijabilnog frekvencijskog transformatora iz programa DIgSILENT

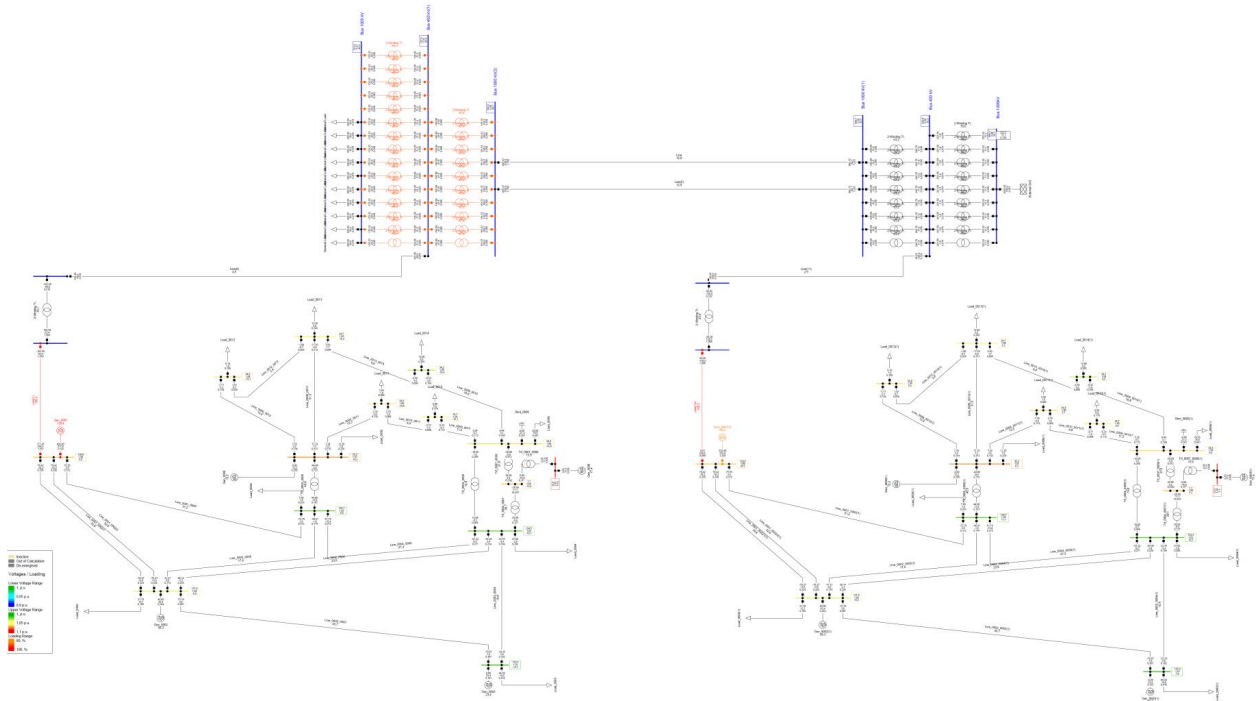


**Slika 6.5.** Parametri 1150 kV x2 -Tannenbaum- 6xAl/Če 680/85 iz programa DIgSILENT

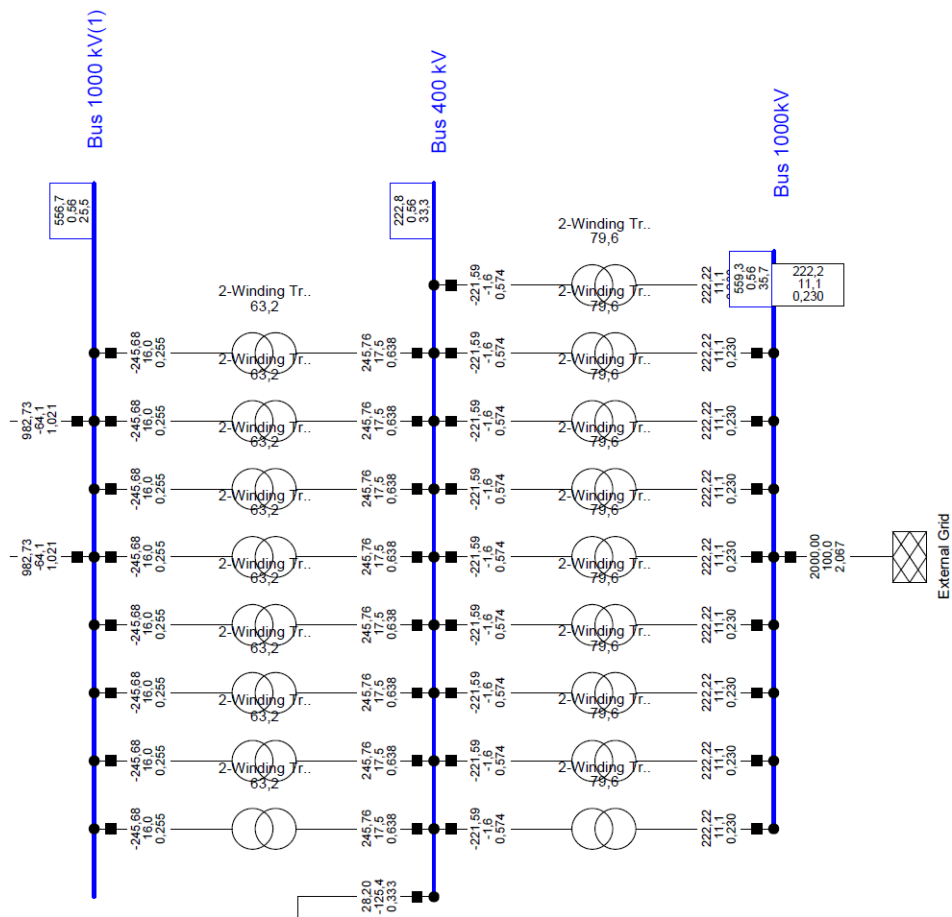
### 6.1.1. Analiza tokova snaga

Analiza tokova snaga je glavna komponenta pri izradi planova, dizajniranja i djelovanju nekog prijenosnog sustava. Za potrebe boljeg razumijevanja VFT sustava, ranije su spomenute pojedine

karakteristike koje sustav posjeduje i definirani su podaci koji će se koristiti u analizi tokova snage. Analiza tokova snage izvodi se za sustave u ustaljenom stanju i pruža nam podatke o naponski prilikama i smanjenju snage u sustavu. Na slici 6.6. su prikazani tokovi snage za opterećenje 2000 MW i 300 MVar. Na slikama 6.7a i 6.7b. prikazani su tokovi snaga i smanjenje snaga sa strane krute mreže i trošila. Vidimo da vodovi i transformatori nisu preopterećeni. Zatim će se s nekoliko simulacija testirati upravljanje tokova djelatne snage promjenom opterećenja i tablično će biti prikazani rezultati utjecaja na VFT i vodove u mreži te će rezultati biti ukratko prokomentirani.



**Slika 6.6.** Tokovi snage pri opterećenju 2000 MW i 300 MVar



Slika 6.7a. Smanjenje snage u VFT sustavu sa strane krute mreže pri opterećenju 2000 MW i 300MVar





**Tablica 6.1.** Smanjenje snage na VFT na sabirnici Bus 1000 kV/ Bus 400 kV pri opterećenju 2000 MW i 300 MVar

| Sabirnica                  | P <sub>1</sub> /HV (MW) | P <sub>2</sub> /LV (MW) | Gubici (MW) | Gubici (kW) | Broj transformatora | Smanjenje snage na VFT-u (MW) |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------|-------------|---------------------|-------------------------------|
| Bus 1000 kV/<br>Bus 400 kV | 222,22                  | 221,59                  | 0,63        | 630         | 9                   | 5,67                          |

**Tablica 6.2.** Smanjenje snage na VFT na sabirnici Bus 400(1) kV/ Bus 1000 kV pri opterećenju 2000 MW i 300 MVar

| Sabirnica                  | P <sub>1</sub> /HV (MW) | P <sub>2</sub> /LV (MW) | Gubici (MW) | Gubici (kW) | Broj transformatora | Smanjenje snage na VFT-u (MW) |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------|-------------|---------------------|-------------------------------|
| Bus 1000 kV/<br>Bus 400 kV | 134,08                  | 133,3                   | 0,75        | 750         | 15                  | 11,25                         |

**Tablica 6.3.** Ukupni gubici na VFT pri opterećenju 2000 MW i 300 MVar

| Sabirnice                     | Gubici zbog tereta (kW) | Gubici trenja, ventilacije i pogona (kW) | Gubici rashladnog uređaja (kW) | Ukupni gubici (kW) | Ukupni gubici (MW) |
|-------------------------------|-------------------------|--|--------------------------------|--------------------|--------------------|
| Bus 1000 kV/<br>Bus 400 kV    | 5670                    | 135000                                   | 245                            | 140915             | 140,9              |
| Bus 400(1) kV/<br>Bus 1000 kV | 11250                   | 225000                                   | 408                            | 236658             | 236,6              |
| Ukupni gubici na VFT (kW)     |                         |  |                                | 377573             | 377,5              |

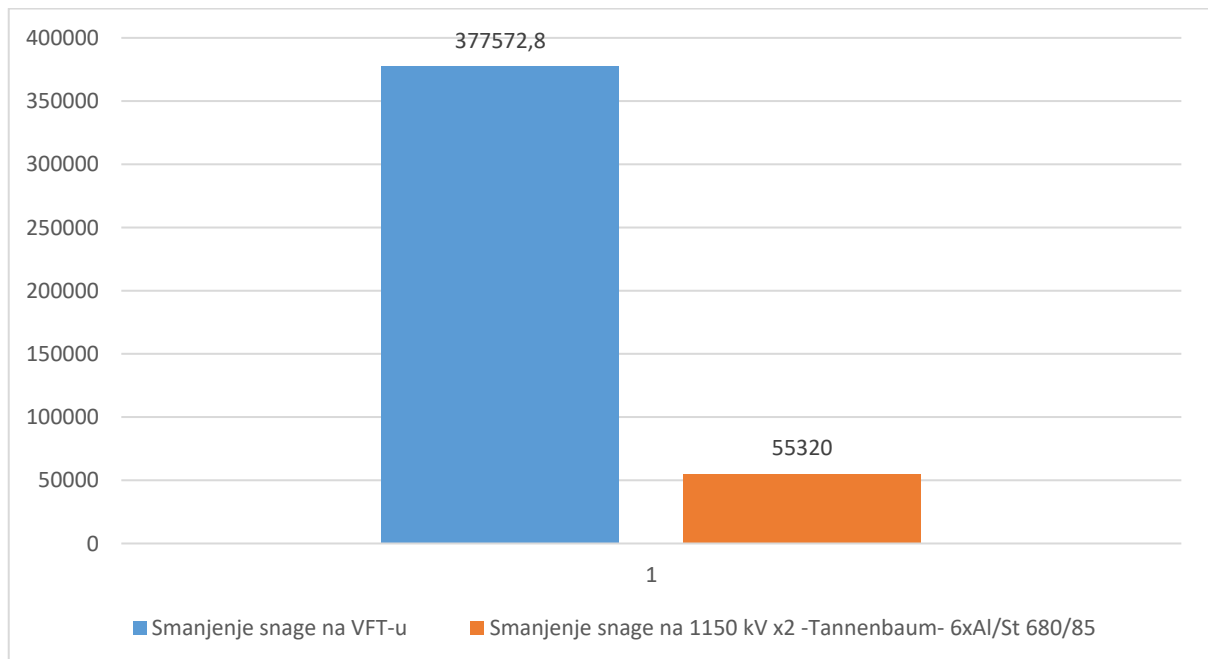
Analizom razlike snage između ukupno predane snage i snage preuzete iz mreže vidi se kako prilikom prijenosa električne energije elektroenergetskim sustavom dolazi do smanjenja snage. Iz analize smanjenja snage na VFT vidi se da ukupni gubici na svim transformatorima iznose 16,92 MW, pri opterećenju od 2000 MW i 300 MVar. U VFT sustav ima ukupno 21 -Winding Transformer Type(3)VFT 400/1000 kV (500 MVA), koji simuliraju varijabilni frekvencijski transformator. Ako tome pridodamo gubitke trenja i gubitke rashladnog uređaja dobijemo da su ukupni gubici VFT 377,5 MW. Za gubitke rashladnog uređaja smo uzeta je vrijednost od 27,2 kW

po transformatoru, što ukupno daje gubitke od 652,8 kW. Osim gubitaka za hlađenje, u tablice postoje podaci za gubitke trenja, ventilacije i pogona za koje smo uzeli da su 3% u odnosu na nazivnu snagu VFT-a.

**Tablica 6.4.** Ukupno smanjenje snage na vodovima pri opterećenju 2000 MW i 300 MVA<sub>r</sub>

| Naziv                                  | Terminal i (MW) | Terminal j (MW) | Gubici snage (MW) | Broj vodova | Ukupno smanjenje snage na vodovima (MW) | Ukupno smanjenje snage na vodovima (kW) |
|--|-----------------|-----------------|-------------------|-------------|---|---|
| 1150 kV x2 - Tannenbaum-6xAl/Če 680/85 | 982,73          | 955,07          | 27,66             | 2           | 55,32                                   | 55320                                   |

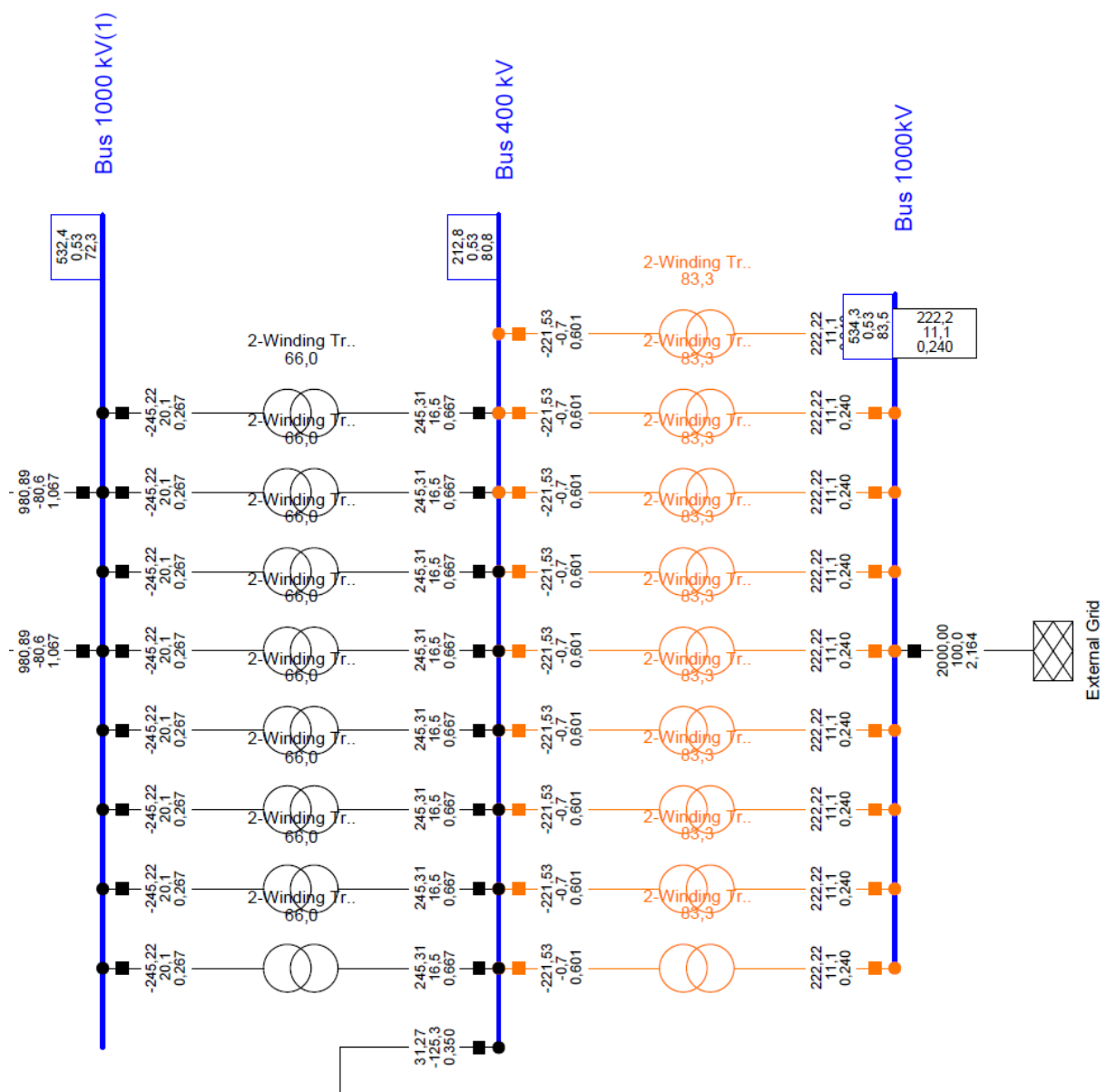
Podaci iz tablice 6.4. govore koliki je ukupno smanjenje snage na vodovima, koji iznose 55 320 kW. Gubici na VFT-u su veći, to je bilo očekivano zbog svih gubitaka na transformatoru. Na slici 6.8. vidi se usporedba smanjenja snage na VFT-u i vodovima. Gubici na VFT-u su veći, to je bilo očekivano zbog svih gubitaka na transformatoru. Ispada da su gubici na VFT gotovo 7 puta veći nego na vodovima.



**Slika 6.8.** Ukupno smanjenje snage na VFT-u i vodovima (kW)

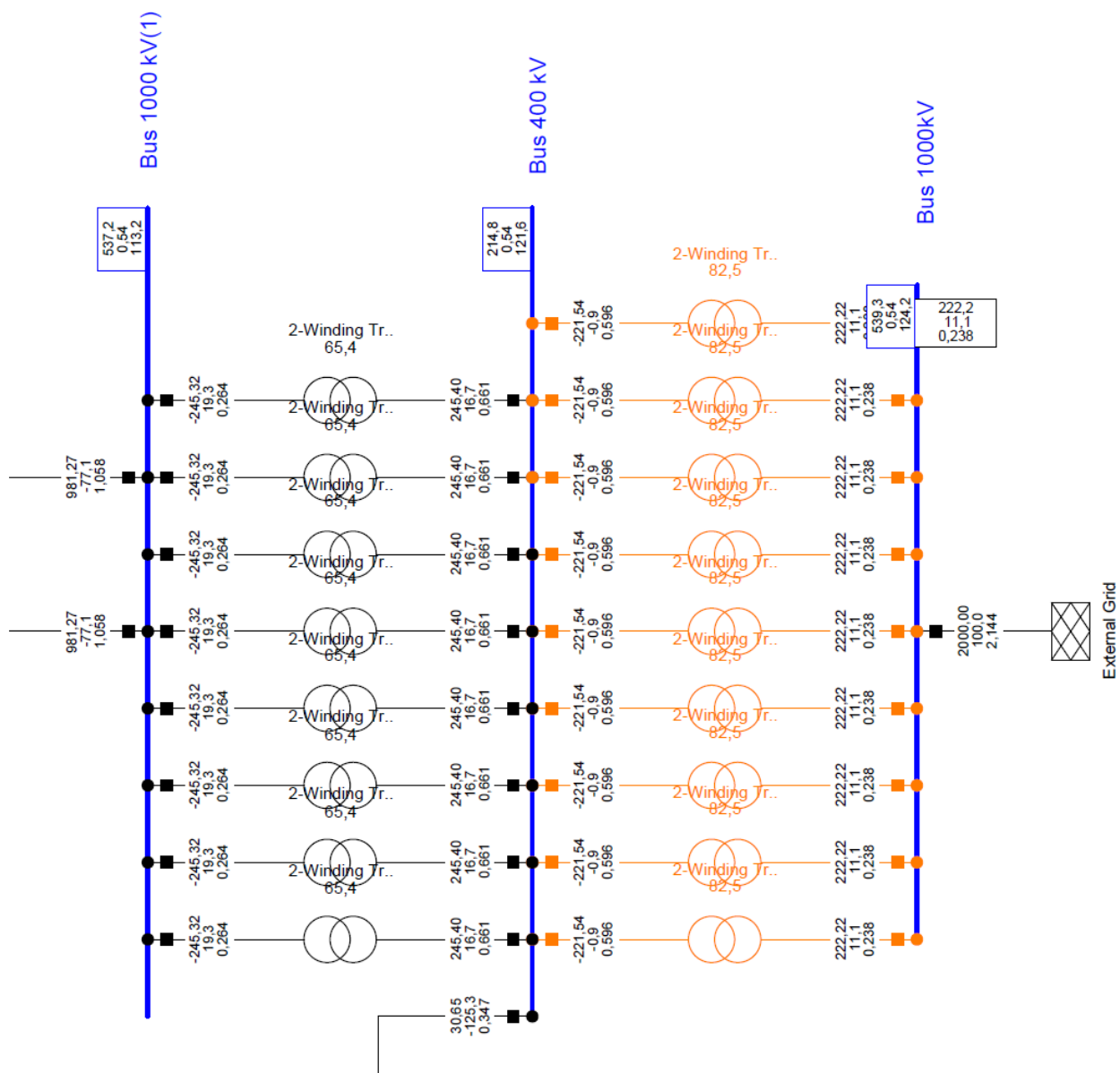
## 6.1.2. Promjena opterećenja

Snaga opterećenja se mijenja za različite iznose djelatne i jalove snage, te se na osnovu tih promjena radne i jalove snage promatraju promjene gubitaka snage na transformatorima i vodovima i utjecaj spojenog opterećenja. Daljnjim analiziranjem VFT sustava mijenja se snaga opterećenja na 1900 i 1800 MW. Na slikama 6.9a. i 6.10a. prikazan je sustav sa snagom opterećenja od 1900 MW i 300 MVAR. Radi lakšeg pregleda sustav je prikazan na dvije slike sa strane krute mreže i trošila.



Slika 6.9a. Smanjenje snage u VFT sustavu sa strane krute mreže pri opterećenju 1900 MW i 300 MVAR





Slika 6.10a. Smanjenje snage u VFT sustavu sa strane krute mreže pri opterećenju 1800 MW i 300 MVar



Rezultati smanjenja snage u slučaju promjene snage opterećenja prikazani su tablicama 6.5.-6.7. Smanjenje snage se promatra u tri slučaja: smanjenje snage na VFT-u, smanjenje snage na vodovima i na kraju smanjenje snage na VFT-u i vodovima. Na kraju smo izračunali relativno smanjenje snage i prikazali ih grafički. Relativno smanjenje snage smo izračunali po formuli 6-1.

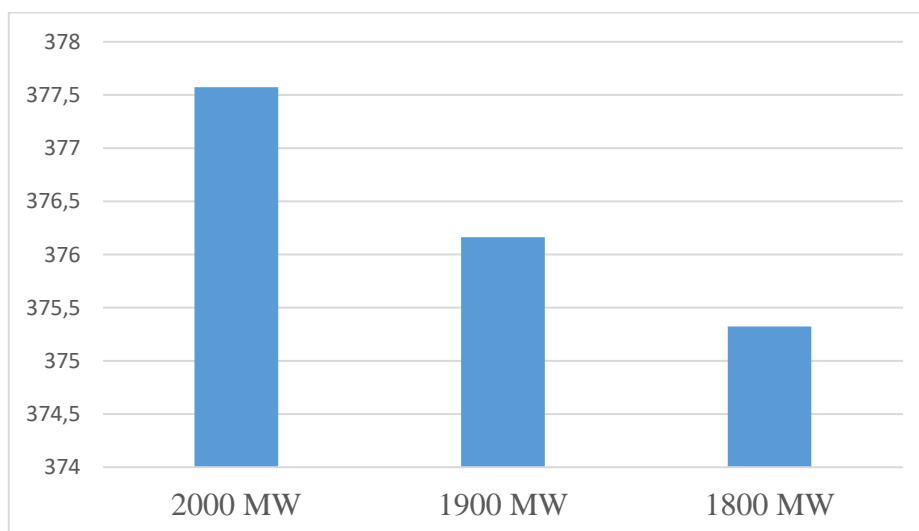
$$P_g = \left(1 - \frac{P_1}{P_2}\right) * 100\% \quad (6-1)$$

Gdje je:

- $P_g$ - postotno smanjenje snage (%)
- $P_1$ - prenesena snaga
- $P_2$ - ulazna snaga u VFT sustav

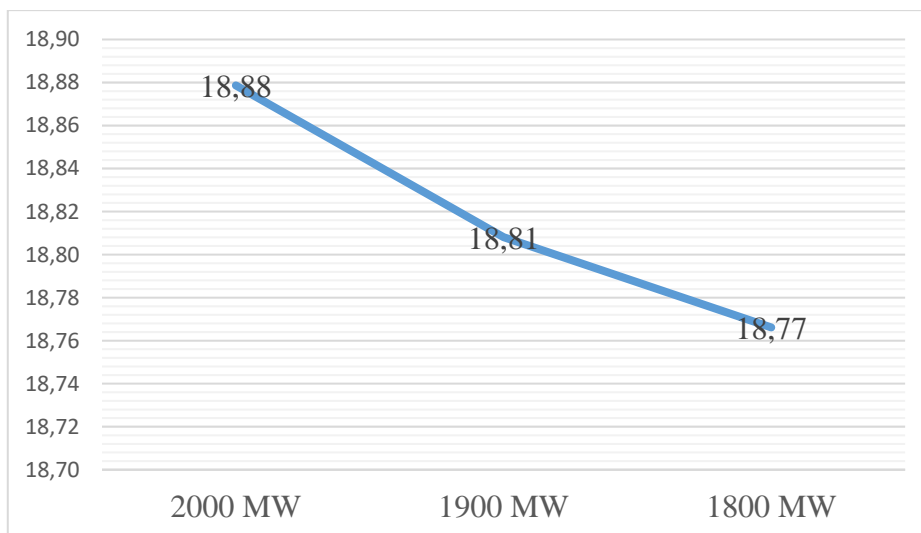
**Tablica 6.5.** Usporedba smanjenja snage i postotnih smanjenja snage na VFT-u pri različitim opterećenjima

| Snaga tereta | Ukupno smanjenje snage na VFT-u (kW) | Ukupno smanjenje snage na VFT-u (MW) | Prenesena snaga (MW) | Postotno smanjenje snage(%) |
|--------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|-----------------------------|
| 2000 MW      | 377572                               | 377,57                               | 1622,42              | 18,88                       |
| 1900 MW      | 376162                               | 376,16                               | 1623,84              | 18,81                       |
| 1800 MW      | 375322                               | 375,32                               | 1624,68              | 18,77                       |



**Slika 6.11.** Ukupno smanjenje snage na VFT-u pri različitim opterećenjima (MW)

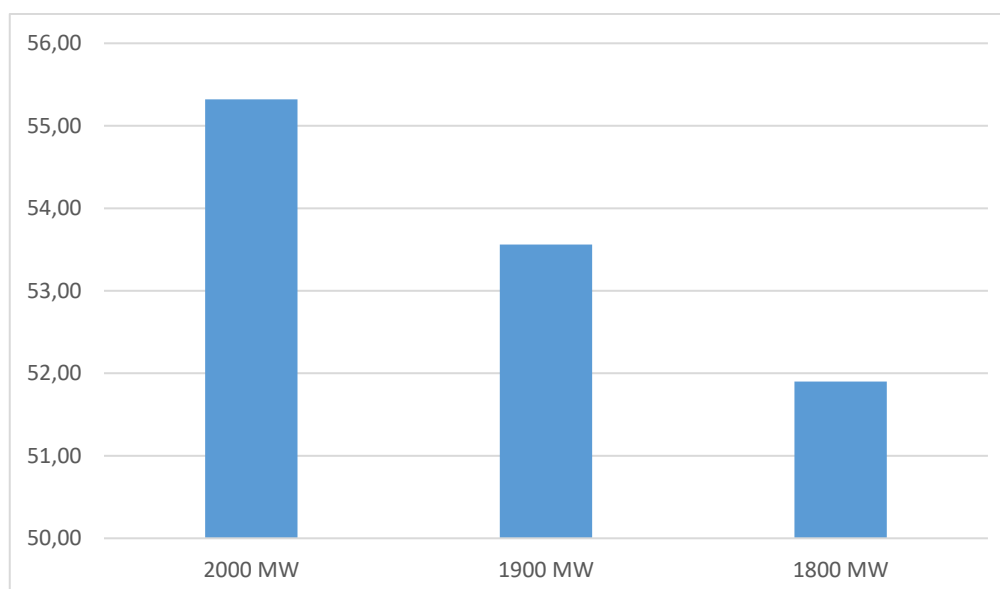




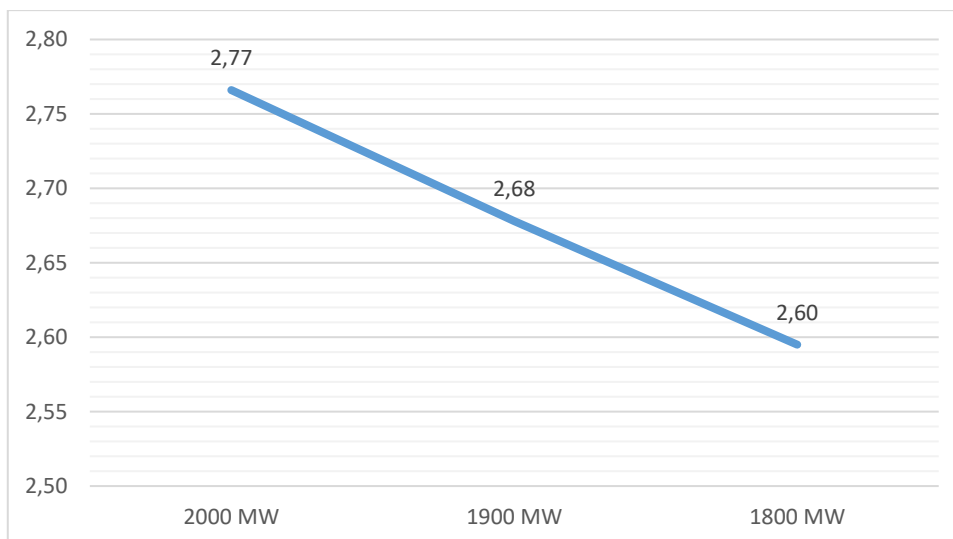
**Slika 6.12.** Postotno smanjenje snage na VFT-u pri različitim opterećenjima (%)

**Tablica 6.6.** Usporedba smanjenja snage i relativnih smanjenja snage na vodovima pri različitim opterećenjima

| Snaga tereta | Ukupno smanjenje snage na vodovima (kW) | Ukupno smanjenje snage na vodovima (MW) | Prenesena snaga (MW) | Postotno smanjenje snage (%) |
|--------------|---|---|----------------------|------------------------------|
| 2000 MW      | 55320                                   | 55,32                                   | 1944,7               | 2,77                         |
| 1900 MW      | 53560                                   | 53,56                                   | 1946,4               | 2,68                         |
| 1800 MW      | 53900                                   | 52,90                                   | 1948,1               | 2,69                         |



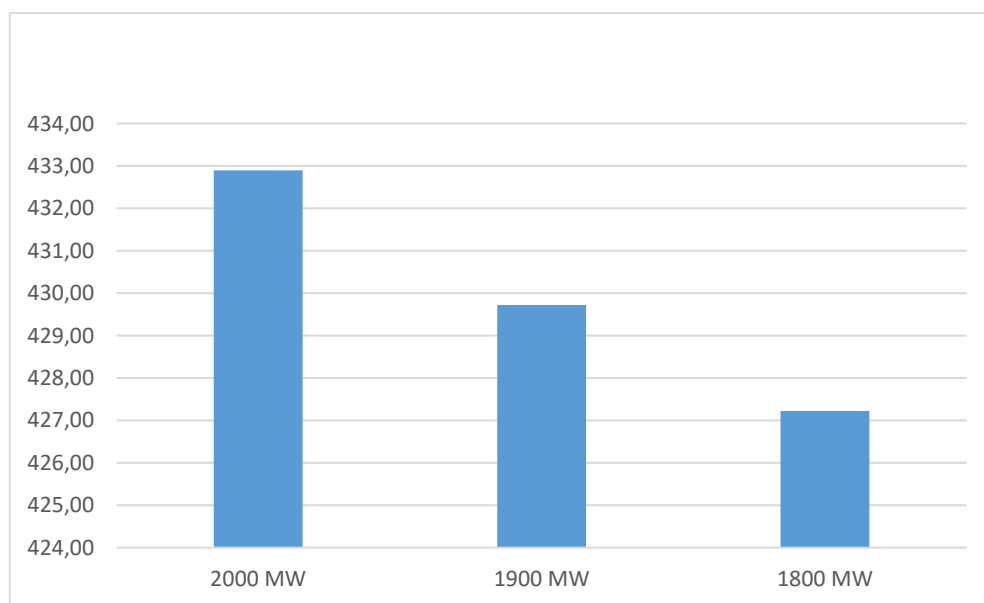
**Slika 6.13.** Ukupno smanjenje snage na vodovima pri različitim opterećenjima (MW)



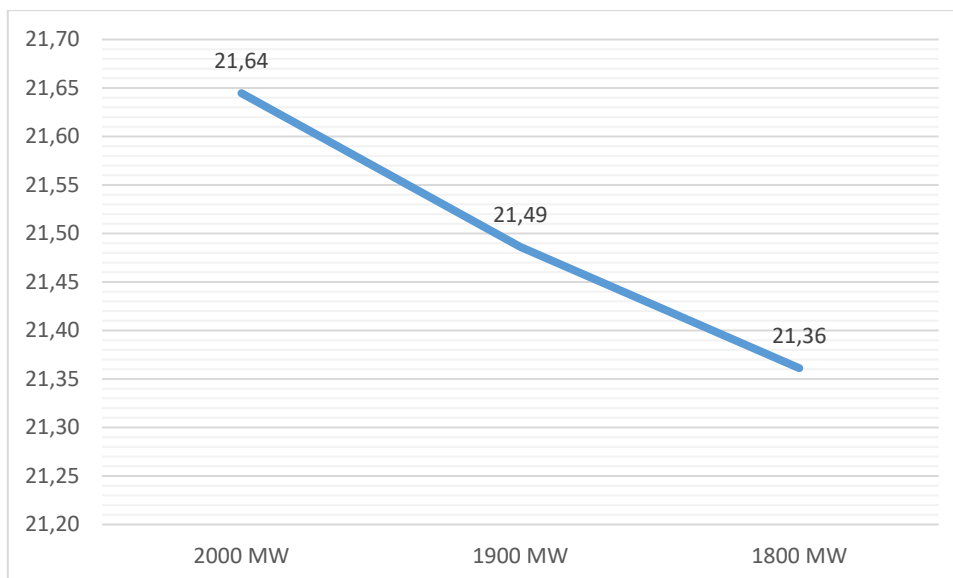
**Slika 6.14.** Postotno smanjenje snage na vodovima pri različitim opterećenjima (%)

**Tablica 6.7.** Usporedba smanjenja snage i relativnih gubitaka na VFT-u i vodovima pri različitim opterećenjima

| Snaga tereta | Ukupno smanjenje snage na vodovima i VFT-u (kW) | Ukupno smanjenje snage na vodovima i VFT-u (MW) | Prenesena snaga (MW) | Postotno smanjenje snage (%) |
|--------------|---|---|----------------------|------------------------------|
| 2000 MW      | 432892  | 432,89  | 1567,11              | 21,64                        |
| 1900 MW      | 429722  | 429,72  | 1570,28              | 21,49                        |
| 1800 MW      | 427222  | 427,22  | 1572,78              | 21,36                        |



**Slika 6.15.** Ukupno smanjenje snage na VFT-u i vodovima pri različitim opterećenjima (MW)



**Slika 6.16.** Postotno smanjenje snage na VFT-u i vodovima pri različitim opterećenjima (MW)

Rezultati smanjenja snage su u skladu sa očekivanjima, najveće smanjenje snage na VFT je pri opterećenju 2000 MW. Smanjenje snage na VFT pri tom opterećenju iznosi 377,57 MW. Relativno smanjenje kod istog opterećenja iznosi 18,88 %. Pri smanjenju opterećenja sustava na 1900 i 1800 MW smanjenje snage je manje.

Smanjenje snage na vodovima je minimalno što prikazuje tablica 6.6. Postotno smanjenje je malo manje od 3 % u sva tri slučaja opterećenja. Snaga na vodovima pri promjeni opterećenja gotovo se smanjuje linearno. Smanjenje snage na VFT-u i vodovima iznosi malo više od 21 %. Analiziranjem dobivenih rezultata zaključujemo da su rezultati unutar dozvoljenih granica, vodovi i sabirnice u sustavu nisu preopterećeni.

### 6.1.3. Ekonomska analiza smanjenja snage

VFT je vrlo kompleksan uređaj što znači da je cijena takvog postrojenja vrlo visoka. Iz tablice 5.5. vidi se koliko iznose ulaganja po kapacitetu. Troškovi ulaganja za 900 MW iznose 102,31 milijuna eura. Uz tehnološke prednosti VFT sustava koje su navedene u poglavlju 5., osim tehničkih prednosti postoje i financijske prednosti VFT sustava koje se temelje na povećanju prodaje električne energije zbog povećanja prijenosne moći. U ovom dijelu se razmatraju ekonomski gubici snage prijenosa. U tablici 6.8. prikazani su novčani gubici električne energije u VFT sustavu. Za potrebe ove analize uzeli smo vrijednost od 150 €/MW.

**Tablica 6.8.** Ukupni godišnji financijski gubici smanjenja raspoložive snage

| Snaga opterećenja | Ukupni gubici na VFT (MW) | Ekonomski gubici (€) |
|-------------------|---------------------------|----------------------|
| 2000 MW           | 377,57                    | 496.130.659,20 €     |
| 1900 MW           | 376,16                    | 494.277.919,20 €     |
| 1800 MW           | 375,32                    | 493.174.159,20 €     |

Formula za računanje gubitka u eurima

$$C_P = j_c \cdot P_g \cdot 8760 \left( \frac{\text{€}}{\text{god}} \right) \quad (6-2)$$

Gdje je:

- $C_P$  - ukupni gubici u eurima kroz godinu dana;
- $j_c$  – jedinična cijena energije 150 €/MW;
- $P_g$  - smanjenje raspoložive snage

Ekonomski gubici u eurima imaju isti trend kao gubici snage. Smanjenjem opterećenja smanjuju se i gubici u eurima. Najveći iznos gubitaka je 496.130.659,20 €, i to je pri opterećenju od 2000 MW. Financijski gubici energije su izraženi na godišnjoj razini.

## 7. ZAKLJUČAK

VFT, odnosno, varijabilni frekvencijski transformator je sustav pomoću kojeg se velika snaga prenosi na veliku udaljenost. Razvojem industrije i općenito povećanjem elektroenergetskih sustava nastavlja se rastući trend potrošnje električne energije. Primjena ovog sustava ima brojne prednosti ali i nedostatke koji se daljnjim razvojem energetske elektronike smanjuju. Glavna prednost VFT sustava je prijenos snage na velike udaljenosti, pored toga ima i bolju ekonomsku isplativost za razliku od drugi uređaja za prijenos snage. Neke od glavnih funkcija su regulacija prijenosa snage, potiskivanje niskofrekventnih oscilacija velikih elektroenergetskih sustava i regulacija frekvencije elektroenergetskih sustava. Osim toga koristi se za asinkrono međusobno povezivanje između mreža s različitim frekvencijama, prijenos snage u slabe i pasivne elektroenergetske mreže, kao izvor napajanja za crni start za drugi elektroenergetski sustav. Primjena ove tehnologije uvelike pomaže u rješavanju postojećih problema koji mogu utjecati na sigurnost međusobno povezanih elektroenergetskih sustava. Međusobno povezane elektroenergetske sustave VFT čini sigurnije i pouzdanije. Također, igra veliku ulogu u izgradnji snažnih, pametnih i učinkovitih modernih velikih mreža. U radu su iznesene osnovne teorije, matematički model, upravljački sustav, radne karakteristike te tehničke i ekonomske karakteristike VFT. U radu je analiziran model VFT sustava. Za simulaciju VFT sustava korištene se dvije mreže IEEE 14 Bus New System. Dvije mreže su povezane preko VFT sustava koji se sastoji od krute mreže, transformatora, vodova i trošila. Kroz simulaciju je provedena analiza tokova snaga za različita opterećenja sustava. Simulacijom se određuju se gubici u prijenosu, gubici, odnosno postotno smanjenje snage iznosi oko 21 %, što je još jedna prednost VFT sustava. Budućnost VFT tehnologije je neupitna i razvijat će se u velikom rasponu mogućnosti i osjetljivosti na različite promjene.

## 8. LITERATURA

- [1] Gesong Chen, Xiaoxin Zhou, Rui Chen "Variable Frequency Transformers for Large Scale Power Systems Interconnection: Theory and Applications" September 17, 2018.
- [2] Yinbiao Shu, Luis Munuera, Jun Yu, Jianbin Fan, Caihao Liang, Geng Dan, Wei Wang, Xing Lu (Ms.), Richard Schomberg, Dongil Lee, Jae Young Yoon, Chan-Ki Kim, Ho-Keun Kim, Stefan Engelhardt, Alexander Rentschler, Shinichi Suganuma, Chengwei Dai, Yan Qin, Hao Hu, Peter Lanctot "Global energy interconnection" IEC 2016.
- [3] Byeonghyeon An\*, Jin Jeon, Minho Lee, Taesik Park "Economical Comparisons of Interconnection Technology for Asynchronous AC Power Grids" 2019, DOI 10.1088/1742-6596/1304/1/012009,
- [4] Bharath Babu Ambati; Parag Kanjiya; Vinod Khadkikar; Mohamed Shawky El Moursi; James L. Kirtley "A Hierarchical Control Strategy With Fault Ride-Through Capability for Variable Frequency Transformer" 05 August 2014, DOI: 10.1109/TEC.2014.233698, 05 August 2014.
- [5] A. Merkhouf, Sanjoy Upadhyay, Pierre Doyon "Variable Frequency Transformer—Concept and Electromagnetic Design Evaluation" January 2009, DOI:10.1109/TEC.2008.2001460,
- [6] R.J. Piwko, Fellow, IEEE, E.V. Larsen, Fellow, IEEE, C.A. Wegner "Variable Frequency Transformer – A New Alternative For Asynchronous Power Transfer" 2006 DOI: 10.1109/PESAFR.2005.1611852
- [7] Mr.sc. Ivica Toljan, dipl.ing.el "Rekonekcija prve i druge paneuropske sinkrone zone UCTE- a" Kvalifikacijski doktorski ispit.
- [8] Xianming Deng, Na Liu, Yuanda Sun, Qifen Guo, and Miaofei Zhang "Design and Analysis of a Novel Variable Frequency Transformer" ACES JOURNAL, Vol. 33, No. 8, August 2018
- [9] Mohd Mohsin Khan, Imdadullah, (Senior Member, IEEE), Jamel Nebhen, And Hafizur Rahman, Zakir Husain "Research on Variable Frequency Transformer: A Smart Power Transmission Technology" 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3099747
- [10] Nasrollahi Kooshiar "Study on the Variable Frequency Transformer's Operation and Frequency Range" Trondheim, March 2022

- [11] E. Nasr Azadani, S. H. Hosseinian, P. Hasanpor Divshali, And B. Vahidi, "Stability Constrained Optimal Power Flow in Deregulated Power Systems" 2011, DOI: 10.1080/15325008.2010.541409
- [12] P.M.Anderson, A.A.Fouad; John Wiley & Sons Inc; "Power System Control and Stability" 2002.
- [13] A. Merkhouf, S.Upadhyay and P. Doyon, "Variable frequency transformer - an overview" 2006, DOI:10.1109/PES.2006.1709639.
- [14] Farhad Ilahi Bakhsh; Mohammad Irshad; M. S. Jamil Asghar "Modeling and simulation of variable frequency transformer for power transfer in-between power system networks" 2011, DOI: 10.1109/IICPE.2011.5728119
- [15] C. Gesong, Z. Xiaoxin. "Digital simulation of variable frequency transformers for asynchronous interconnection in power systems" 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific Dalian, China DOI: 10.1109/TDC.2005.1546991
- [16] Imdadullah, Syed Muhammad Amrr, M. S. Jamil Asghar "A Comprehensive Review of Power Flow Controllers in Interconnected Power System Networks" January 2020, DOI:10.1109/ACCESS.2020.2968461
- [17] J.J. Marczewski. "VFT applications between grid control areas" J.J. Marczewski. Power Engineering Society General Meeting, 2007. DOI: 10.1109/PES.2007.386183
- [18] Jan Machowski, J.W. Bialek, J.R. Bumby, "Power System Dynamics. Stability and Control" January 2012.
- [19] P.M.Anderson, A.A.Fouad; John Wiley & Sons Inc; "Power System Control and Stability" 2002.
- [20] C. Gesong "Modeling and Control of Variable Frequency Transformer for in Power Systems" D. Phil Thesis. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2010.
- [21] Bortoni, Edson, et al. "The Benefits of Variable Speed Operation in Hydropower Plants Driven by Francis Turbines." in *Energies* (Basel), vol. 12, no. 19, 2019, p. 3719.
- [22] Yun,W.C.; Zhang, Z.X., "Electric power grid interconnection in Northeast Asia." in *Energy Policy* 2006.

- [23] Ongsakul,W.; Teng, K.; Marichez, S.; Jiang, H., "An innovation idea for energy transition towards sustainable and resilient societies: Global energy interconnection." in Glob. Energy Interconnect. 2018.
- [24] David Elliott, "Emergence of European supergrids – Essay on strategy issues" in Energy Strategy Reviews. 2013, DOI: 10.1016/j.esr.2012.04.001
- [25] Imdadullah, Alamri B, Hossain MA, Asghar MSJ. , "Electric Power Network Interconnection: A Review on Current Status, Future Prospects and Research Direction." in Electronics. 2021; DOI: 10.3390/electronics10172179
- [26] D. Mc Nabb, D. Nadeau, A. Nantel, E. Pratico, E. Larsen, G. Sybille, "Transient and dynamic modeling of the new Langlois VFT asynchronous tie and validation with commissioning tests" presented at the 6th International Conference on Power System Transients (IPST'05), Montreal, Québec, Canada, June 20–23, 2005.
- [27] C. Gesong, Z. Xiaoxin, S. Ruihua "Design of self-adaptive damping controller to low-frequency power oscillation in interconnected power systems based on VFTC" 2011.
- [28] C. Gesong, Y. Yonghua, T. Yong "Studies on resonance phenomena caused by energization of transformers" PowerCon 2002, Kunmin, China, 2002.
- [29] B. B. Ambati and V. Khadkikar, "Variable frequency transformer configuration for decoupled active-reactive powers transfer control," IEEE Trans. Energy Convers. 2011. DOI: 10.1109/TEC.2016.2550558
- [30] S.-Z. Chen, J. Lu, G. Zhang, and Y. Zhang, "Immunizing variable frequency transformer from dual-side asymmetrical grid faults via a singleconverter- based novel control strategy," IEEE Trans. Power Del., vol. 35, no. 3, pp. 1330-1338, Jun. 2020. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2940771
- [31] X. Xiaorong, J. Qirong. "Principle and Application of Flexible AC Transmission Systems" Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [32] Saša Blanuša "Elektroenergetska interkonekcija velikih elektroenergetskih sustava" Diplomski rad, 2016.



## SAŽETAK

Problematika prijenosa velikih djelatnih i jalovih snaga, ali i samog pogona dugačkih prijenosnih vodova najviših napona kroz zamkaste i radijalne mreže na velike udaljenosti postaje danas vrlo interesantna i zanimljiva. S jedne strane javljaju se problemi kutne i naponske stabilnosti vodova, pa onda i posljedično EES-a, koji se mogu i približiti opasnom granicama stabilnosti uslijed čega može doći do naponskog sloma. Posebni važno pitanje predstavlja utvrđivanje realnog iznosa gubitaka i ekonomičnosti takvog prijenosa snaga u slučaju pogona dugačkih prijenosnih vodova najviših napona. Zahtjevi za prijenosom velikih snaga iz udaljenih proizvođačkih područja u velika potrošačka područja, nameću potrebu ispitivanja mogućnosti primjene varijabilnih frekvencijskih transformatora za povezivanje tih udaljenih područja. Cilj ovog rada je optimirati parametre sustava i dati prikaz na realnoj mreži i EES-u.

**KLJUČNE RIJEČI:** moderni elektroenergetski sustavi, varijabilni frekvencijski transformator, HVDC, prijenos na velike udaljenosti, regulacija frekvencije, optimizacija tokova snaga.

## ABSTRACT

The problem of transmission of large active and reactive forces, but also the operation of long transmission lines of the highest voltages through trapped and radial networks over long distances is becoming very interesting and interesting today. On the one hand, there are problems of angular and voltage stability of lines, and then consequently of the power system, which can approach the dangerous limits of stability, which can lead to voltage breakdown. A particularly important issue is to determine the real amount of losses and the cost-effectiveness of such power transmission in the case of operation of long transmission lines of the highest voltages. The requirements for the transmission of high power from remote production areas to large consumer areas, impose the need to examine the possibility of using variable frequency transformers to connect these remote areas. The aim of this paper is to optimize the system parameters and give an overview of the real network and the power system.

**KEY WORDS:** modern power system, Variable frequency transformer, HVDC, transmission over long distances, frequency regulation, optimization of power flows.

## **ŽIVOTOPIS**

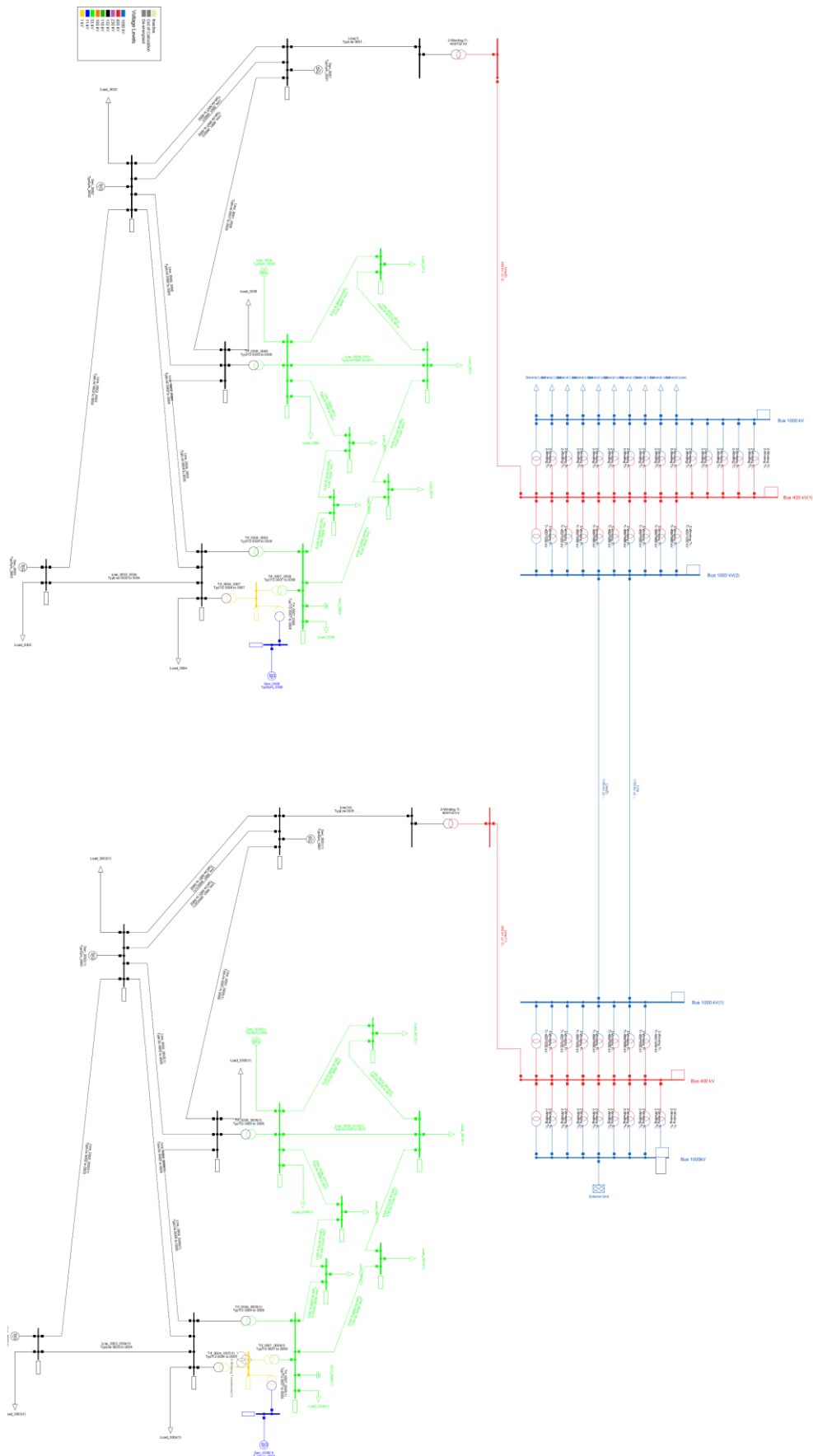
Denis Vuzem je rođen 1998. godine u Našicama, Republika Hrvatska. Osnovnu školu je pohađao u Našicama. Nakon završetka osnovne škole upisuje Srednju Školu Isidora Kršnjavog u Našicama, smjer tehničar za elektroniku. Po završetku srednje škole upisuje se na Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, smjer: elektroenergetika. Preddiplomski stručni studij završava 2019. godine te upisuje diplomski studiji elektroenergetike, smjer: elektroenergetski sustavi.

---

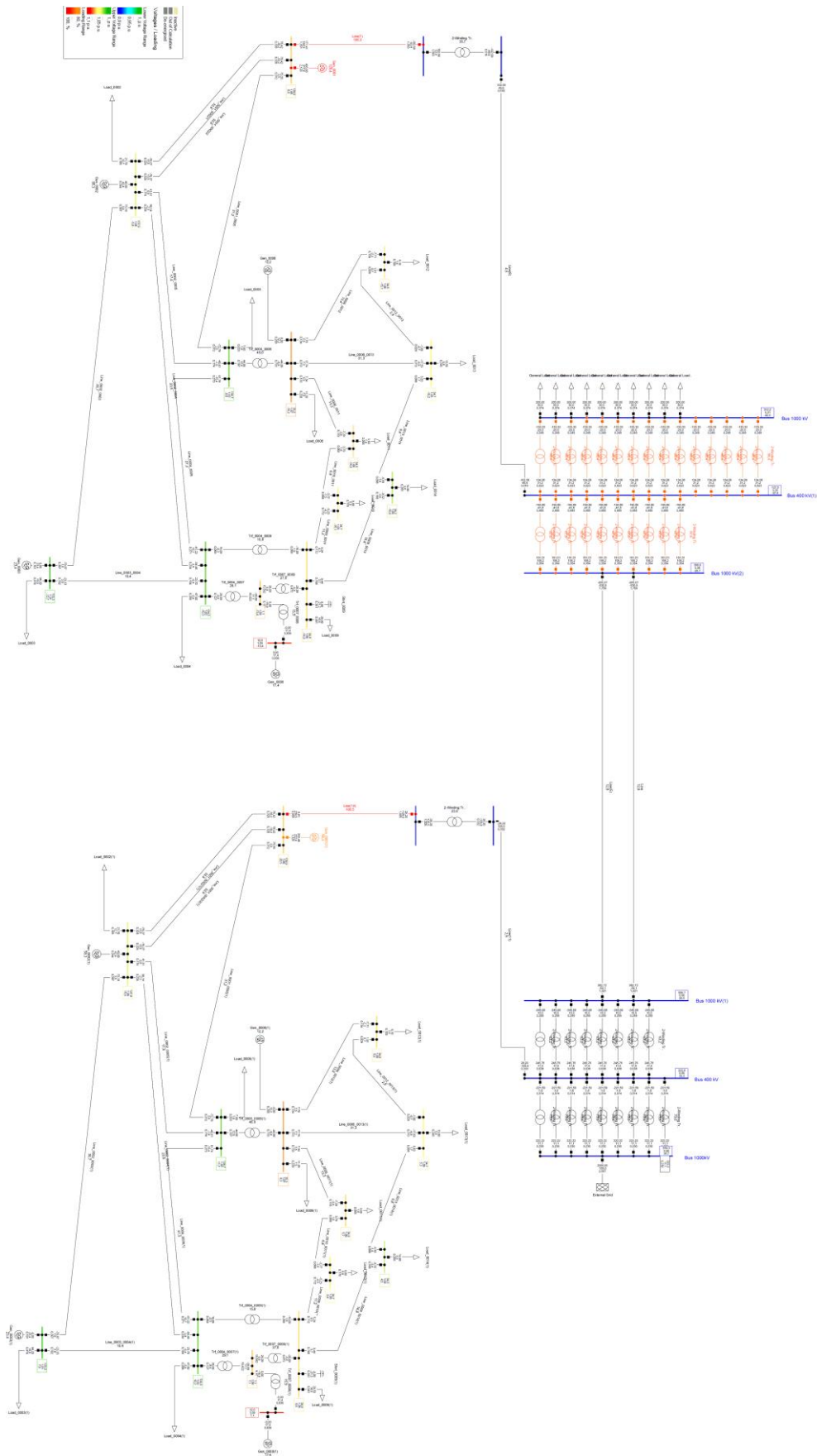
Potpis autora

## **PRILOZI:**

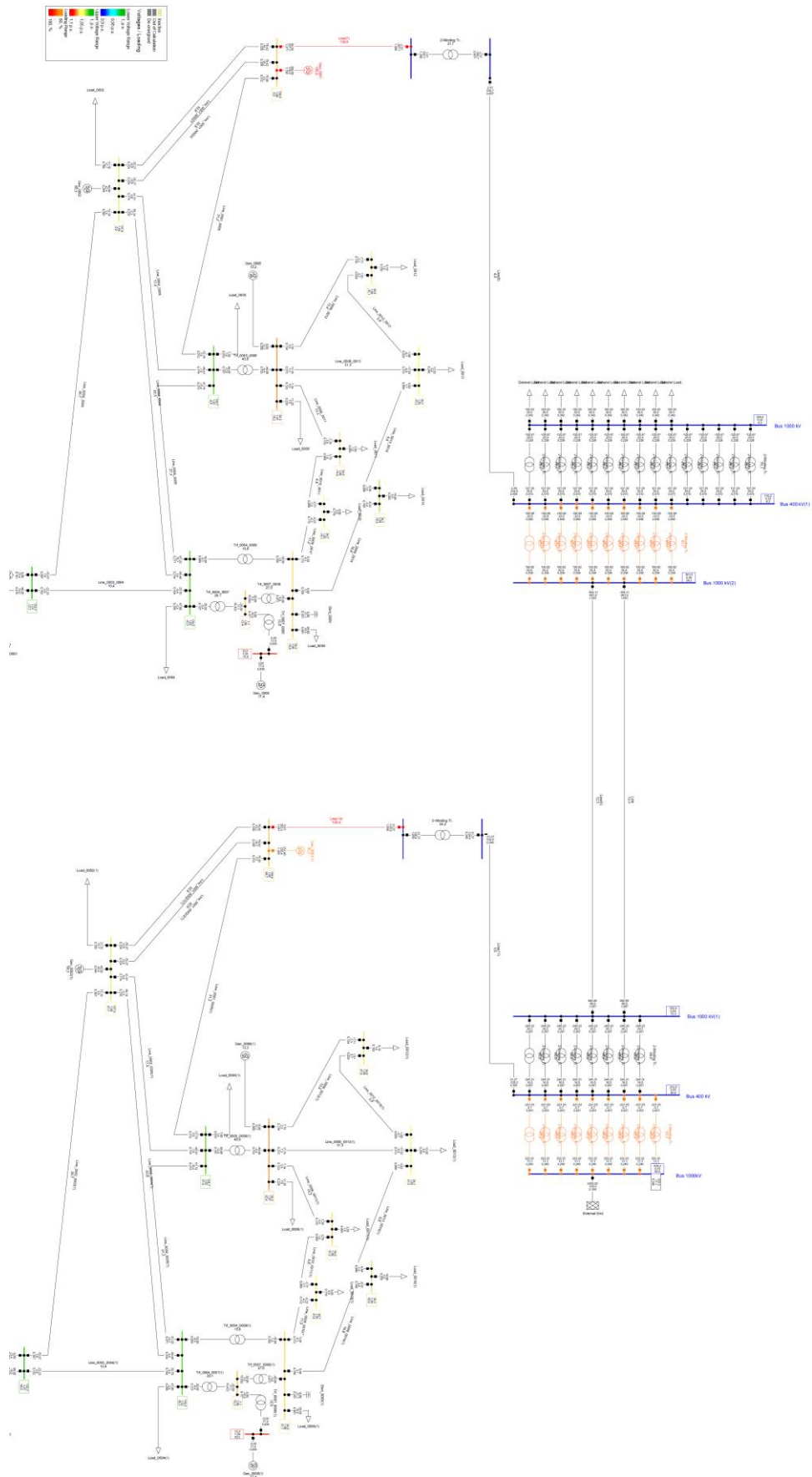
|               |    |
|---------------|----|
| Prilog 1..... | 64 |
| Prilog 2..... | 65 |
| Prilog 3..... | 66 |
| Prilog 4..... | 67 |



Prilog 1: Shema VFT sustava sa dva IEEE 14 Bus System



Prilog 2: Tokovi snage pri opterećenju 2000 MW i 300 MVar



Prilog 3: Tokovi snage pri opterećenju 1900 MW i 300 MVar

