

DOI: [10.46793/CIGRE37.B4.02](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.B4.02)**B4.02****PRENOS ENERGIJE HVDC SISTEMOM UZ PRIMENU ENERGETSKE ELEKTRONIKE****ENERGY TRANSMISSION USING A HVDC SYSTEM WITH THE APPLICATION OF POWER ELECTRONICS****Aleksandar Stojišić, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Milići, Republika Srpska/BiH**

Kratak sadržaj: U temi je analiziran sve učestaliji razvoj „offshore“ vjetro elektrana na velikim udaljenostima od kopna, te primjenu HVDC sistema prenosa uz primjenu energetske elektronike. U samoj temi je vođeno računa o elementima takvog sistema, njihovog funkcionisanja, kao i o tehnokoekonomskim aspektima jednog takvog sistema prenosa.

Ključne reči: *Prenos, HVDC, Energetska elektronika*

Abstract: The topic analyzed the increasing development of offshore wind farms at great distances from the mainland and the application of HVDC transmission systems utilizing power electronics. It examined the key components of such systems, their functionality, and the techno-economic aspects of HVDC transmission for offshore wind energy integration.

Key words: *Transmission, HVDC, Power electronics*

1 UVOD

Usled sve veće potražnje za električnom energijom proširuju se proizvodni kapaciteti. Najveće proizvodne kapacitete predstavljaju konvencionalne elektrane. Zbog sve većeg uticaja tih elektrana na zagađenost atmosfere, životne sredine, kao i trošenja resursa iz obnovljivih izvora, razvijaju se proizvodni kapaciteti sa obnovljivim izvorima i zelenom energijom. Razvijanje novih proizvodnih kapaciteta teče u smjeru maksimalnog iskorišćenja obnovljivih izvora (sunce, vjetar, voda, vodonik itd.), kao i povećanju efikasnosti konverzije energije iz tih kapaciteta i njihovoj optimizaciji i monitoringu. Vjetroelektrane kao takve su pronašle svoje mjesto u integraciji novih proizvodnih kapaciteta u sistem. Brzine vjetra na moru su veće nego na kopnu, tako da farme vjetrogeneratora na moru generišu više električne energije po količini instaliranog kapaciteta. Većina morskih vjetroelektrana koristi vjetroturbine sa fiksnim temeljima u relativno plitkoj vodi. Plutajuće vjetroturbine za dublje vode su u ranijoj fazi razvoja i primjene [5]. Usled velike udaljenosti od kopna, u ovom radu je analiziran prenos energije visokonaponskim jednosmjernim sistemom realizovan pomoću različitih elemenata elektroenergetskog sistema u kome veliku ulogu zauzima kako niskonaponska, tako i visokonaponska energetska elektronika.

Korišćena literatura sadrži elemente elektroenergetskog HVDC sistema.

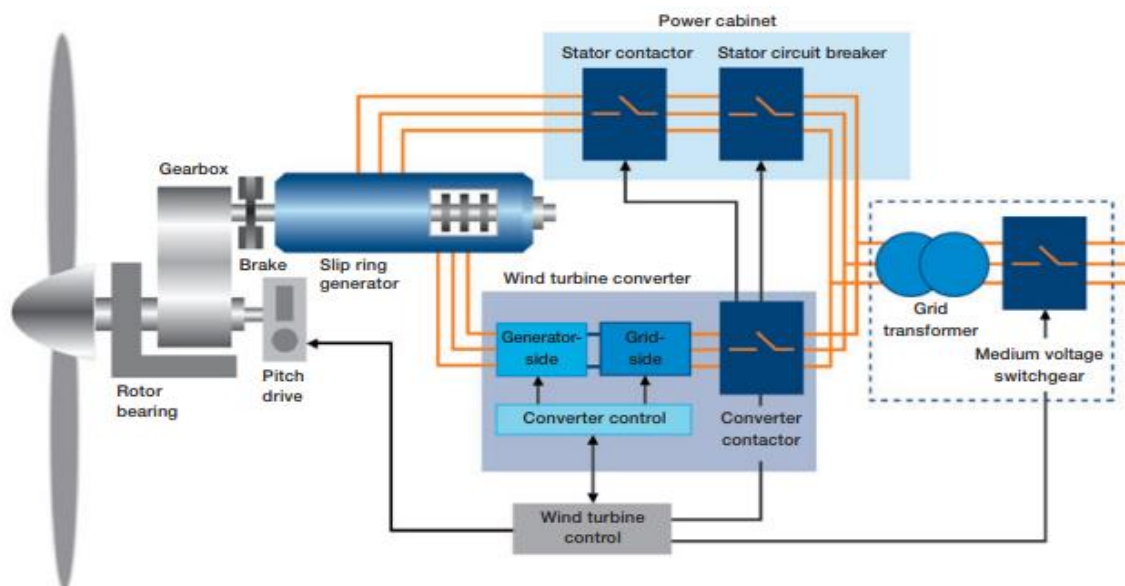
Rad je podijeljen u nekoliko segmenata koji obuhvataju elemente ovakvog sistema, njihovo spregnuto funkcionisanje predstavljeno kroz simulaciju, kao i prednosti visokonaponskog jednosmjernog sistema

u odnosu na visokonaponski naizmjenični sistem prenosa u tehničkom i ekonomskom smislu pri specifičnim uslovima u vodi.

2 ELEMENTI VISOKONAPONSKOG JEDNOSMJERNOG SISTEMA PRENOSA ELEKTRIČNE ENERGIJE PRI PROIZVODNJI IZ VJETROELEKTRANA

2.1 DVOSTRUKO NAPAJANI INDUKCIONI GENERATOR

Dvostruko napajani indukcionni generator (DFIG) je mašina koja se široko koristi u vjetroelettranama. Zasniva se na asinhronom generatoru sa višefaznim namotanim rotorom i višefaznim kliznim prstenovima sa četkicama koje omogućavaju pristup namotajima rotora. Iako je moguće izbjeći upotrebu višefaznih kliznih prstenova, to dovodi do problema sa efikasnošću, troškovima i dimenzijama. Bolja alternativa je električna mašina sa namotanim rotorom bez četkica, koja takođe omogućava dvostruko napajanje. Osnovni princip DFIG-a je da su statorski namoti povezani direktno na mrežu, dok su rotorski namoti povezani na dvosmjerni pretvarač putem kliznih prstenova. Ovaj pretvarač kontroliše rotorske i struje mreže, omogućavajući da frekvencija rotora bude različita od frekvencije mreže. Korišćenjem pretvarača za kontrolu struja rotora moguće je nezavisno podešavati aktivnu i reaktivnu snagu koju stator isporučuje mreži, bez obzira na brzinu obrtanja generatora. U tu svrhu koristi se princip regulacije struje u d-q sistemu ili direktna regulacija obrtnog momenta (DTC – Direct Torque Control). Pokazalo se da DTC metoda obezbjeđuje veću stabilnost u odnosu na regulaciju pomoću vektora kontrole, naročito kada se zahtjeva visoka reaktivna struja iz generatora. Rotor generatora obično ima 2 do 3 puta više namotaja od statora, što rezultuje višim naponom rotora i nižim strujama. U standardnom opsegu rada od $\pm 30\%$ oko sinhronne brzine, nazivna struja pretvarača je niža, što smanjuje ukupne troškove pretvarača. Međutim, glavni nedostatak je to što kontrola izvan ovog opsega nije moguća zbog previsokog napona rotora. Pored toga, prekidi u mreži mogu dodatno povećati napon rotora. Kako bi se spriječilo da visoki napon i struja oštete tranzistore sa izolovanim gejtom (IGBT) i diode u pretvaraču, koristi se zaštitni krug poznat kao „crowbar“ zaštita. Dvostruko napajana mašina ima nekoliko prednosti u odnosu na konvencionalne indukcionne generatore u primjeni za vjetroelettrane. Prvo, pošto se rotorske struje kontrolišu putem energetske elektronike, asinhroni generator može i da generiše i da prima reaktivnu snagu. Ovo je ključno za stabilnost elektroenergetskog sistema i omogućava mašini da podrži mrežu tokom ozbiljnih poremećaja napona. Drugo, kontrola napona i struja rotora omogućava asinhronom generatoru da ostane sinhronizovan sa mrežom čak i kada se brzina vjetroturbine mijenja. Vjetroturbina sa promjenljivom brzinom efikasnije koristi dostupnu energiju vjetra u poređenju sa onom sa fiksnom brzinom, posebno pri slabim vjetrovima. Treće, troškovi pretvarača su niži u poređenju sa drugim rješenjima [1].



Slika 1: Princip kontrole vjetroturbine i generatora

2.2 NISKONAPONSKA ENERGETSKA ELEKTRONIKA

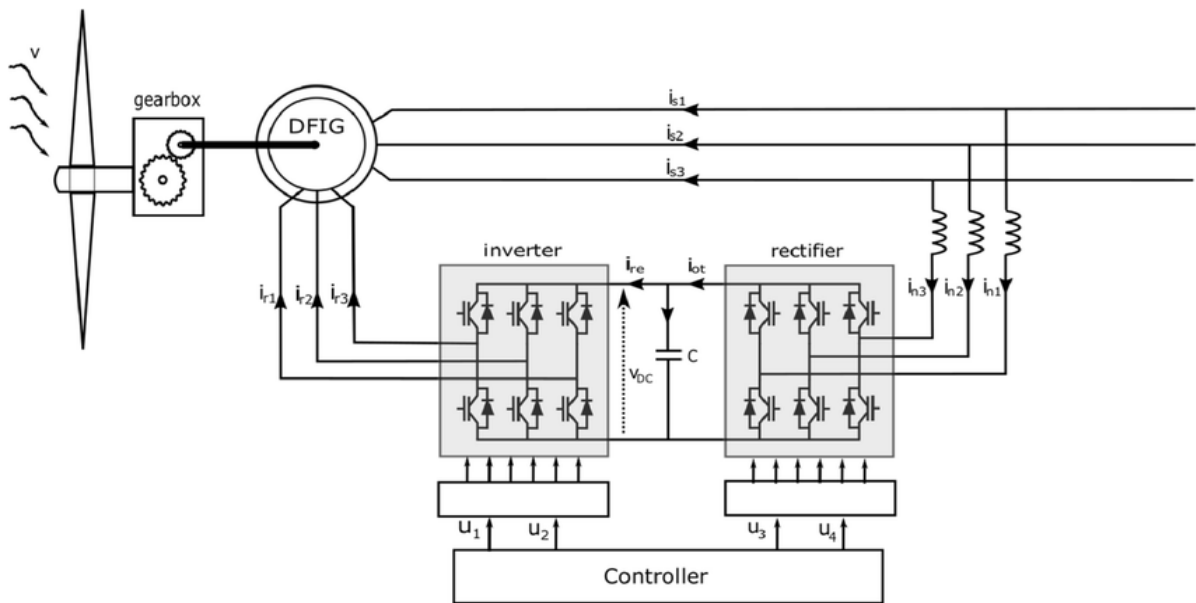
Dvosmjerni (back-to-back) pretvarači se često koriste za integraciju mikromreža i obnovljivih izvora energije u glavnu elektroenergetsku mrežu. Prednosti ove topologije postižu se zahvaljujući fleksibilnoj kontroli i jednosmjernom (DC) povezivanju između dva pretvarača. Na primjer, poremećaji na strani mikromreže gotovo da nemaju uticaja na glavnu mrežu. Još jedna prednost ove topologije je mogućnost međusobnog povezivanja mreža sa različitim frekvencijama. Pored toga, ova konfiguracija omogućava lako ostvarivanje dvosmjernog toka aktivne i reaktivne snage pomoću uobičajenih kontrolnih tehnika, poput „droop“ kontrole. Fleksibilna kontrola dvosmjernog pretvarača omogućava rješavanje problema koji nastaju pri integraciji distribuiranih izvora energije u glavnu mrežu, poput negativnog uticaja na sistem zaštite. Na primjer, dvosmjerni pretvarač može izolovati mikromrežu tokom kvara, dok istovremeno održava stabilan DC napon kako bi omogućio nesmetanu resinhronizaciju nakon otklanjanja kvara.

Dvosmjerni pretvarač se sastoji od dva identična pretvarača:

- Pretvarač na strani mašine, koji predstavlja trofazni ispravljač i konvertuje naizmjenični (AC) napon u jednosmjerni (DC) napon.
- Pretvarač na strani mreže, koji predstavlja inverter i konvertuje DC napon u AC napon usklađen sa naponom i frekvencijom mreže.

Kako bi se postigla jednostavna i nezavisna kontrola aktivne i reaktivne snage, naponi i struje mašine transformišu se u referentni okvir rotora pomoću Parkove transformacije. U ovom koordinatnom sistemu, naponi i struje u direktnoj i kvadraturnoj osi su konstantne vrijednosti u stacionarnom stanju. Aktivna i reaktivna snaga zavise od komponenti napona u ove dvije ose.

Da bi se obezbjedila nezavisna regulacija aktivne i reaktivne snage, koristi se $\alpha\beta$ transformacija za detekciju faznog ugla napona. Ovaj ugao se zatim koristi kao referentni ugao u $qd0$ transformaciji, pri čemu se napon u direktnoj osi postavlja na nulu, dok se napon u kvadraturnoj osi postavlja na maksimalnu vrijednost. Na ovaj način, promjena struje u kvadraturnoj osi utiče samo na aktivnu snagu, dok promjena struje u direktnoj osi utiče samo na reaktivnu snagu.



Slika 2: Dvosmjerni pretvarač

2.3 VISOKONAPONSKA ENERGETSKA ELEKTRONIKA

Modularni pretvarač sa više naponskih nivoa (MMC) predstavlja skalabilnu tehnologiju u kojoj se nivo napona određuje brojem podmodula (SM). Ova tehnologija je primjenljiva čak i za najviše prenosne napone. Osnovni koncept MMC-a zasniva se na kaskadnom povezivanju više podmodula, od kojih svaki ima svoj individualni upravljački sistem. Zbog toga, MMC može funkcionisati kao konvertor napona sa velikim brojem diskretnih naponskih nivoa, čime se postiže precizna kontrola i minimizacija harmonijskih izobličenja [4].

2.3.1 Struktura MMC-a

Na slici 3 prikazana je trofazna topologija MMC-a, pri čemu su gornja i donja grana povezane u seriju između dva DC priključka. Svaka grana se sastoji od više serijski povezanih podmodula. Svaki podmodul (SM) sadrži:

- Dva IGBT tranzistora
- Dvije povratne diode
- Jedan DC kondenzator C

Diode rade naizmjenično – kada gornja provodi, donja ne provodi i obrnuto. U režimu rada kada gornja vodi, podmodul se nalazi u uključenom stanju (inserted state), pri čemu se kondenzator puni ili prazni. Suprotno tome, kada gornja ne provodi, a donja provodi, podmodul prelazi u zaobiđeno stanje (bypassed state).

Pod normalnim uslovima rada, terminalni napon podmodula može imati vrijednost nula ili napon kondenzatora. Prema stanju uključenja IGBT tranzistora, moguće je generisati tri izlazna naponska nivoa, čime se obezbjeđuje visok kvalitet izlaznog signala uz minimalnu generaciju harmonijskih komponenti.

Kada se obnovljivi izvori energije (RE) priključuju na elektroenergetsku mrežu, ključni izazovi uključuju stohastičku prirodu proizvodnje i harmonijska izobličenja koju generiše energetska

elektronika. Kako bi se riješili ovi problemi, u elektroenergetske sisteme se uvode modularni pretvarači koji imaju niži nivo harmonijskih komponenti i elektromagnetnih smetnji.

Njihove prednosti uključuju:

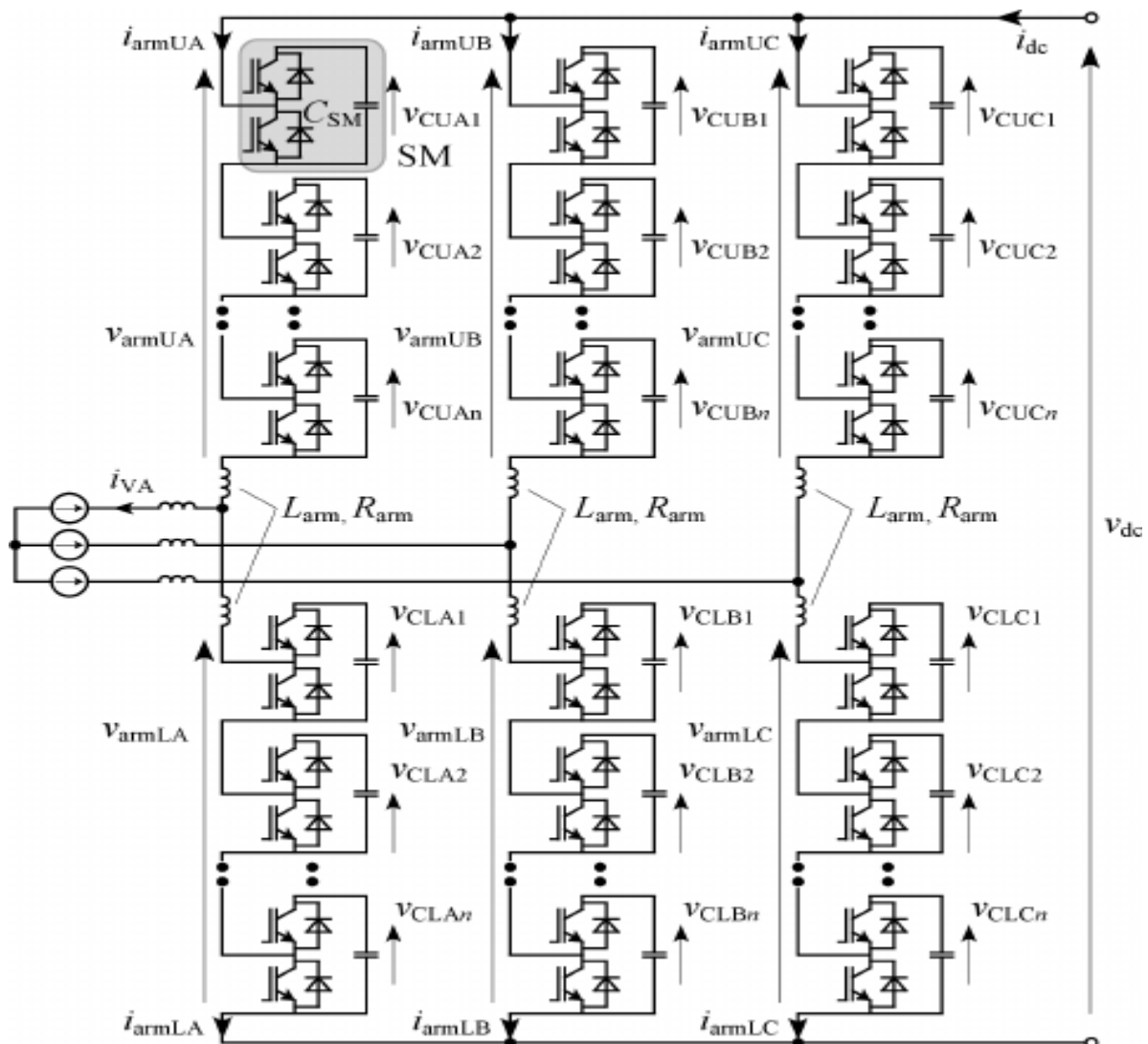
- Visok kvalitet izlaznog napona sa stepenastim talasnim oblikom
- Ulaznu struju sa niskim izobličenjem
- Nisku frekvenciju preklapanja, čime se smanjuju gubici u sistemu

2.3.2 Izazovi pri integraciji modularnih pretvarača

Iako ovi pretvarači značajno poboljšavaju kvalitet električne energije, postoji nekoliko ključnih izazova pri njihovoj primjeni:

1. **Balansiranje napona na kondenzatorima** – potrebno je precizno regulisati napon kondenzatora kako bi sistem radio stabilno.
2. **Suzbijanje cirkulacionih struja** – neželjene struje unutar sistema mogu izazvati pregrijevanje i gubitke prilikom kondukcije.
3. **Otpornost na kvarove** – potrebni su mehanizmi za nastavak rada u slučaju kvara pojedinih modula [4].

Kako bi se riješili ovi problemi, istraživanja su usmjerena na optimizaciju topologije kola, poboljšanje strategija upravljanja, kao i na razvoj efikasnih modulacionih tehnika koje omogućavaju jednostavniji i pouzdaniji rad sistema.



Slika 3: MMC

2.4 VISOKONAPONSKI JEDNOSMJERNI KABLOVI

HVDC kablovi mogu biti različiti konstrukcija u zavisnosti od primjene i sredine u kojoj se postavljaju.

a) Ekstrudirani kablovi (XLPE - Cross-linked Polyethylene)

- Napravljen od polietilenske izolacije
- Prednosti: Visoka termička otpornost, lakoća instalacije, fleksibilnost
- Nedostaci: Osjetljivost na delaminaciju i starenje materijala

b) Kablovi sa impregniranim papirom (MI - Mass Impregnated)

- Sadrže papirnu izolaciju impregnisanu specijalnim uljem
- Prednosti: Dugotrajnost, velika pouzdanost, otporan na visoke napone
- Nedostaci: Veća masa i složenija instalacija

c) Kablovi sa fluidnom izolacijom (Oil-filled cables)

- Koriste tečno izolaciono sredstvo unutar kablovske strukture
- Prednosti: Odlična dielektrična svojstva
- Nedostaci: Potencijalni ekološki problemi zbog curenja fluida

HVDC kablovi se koriste u različitim elektroenergetskim sistemima širom svijeta:

- Podmorski kablovi – Omogućavaju povezivanje udaljenih kopnenih elektroenergetskih sistema ili povezivanje ostrva sa kontinentalnom mrežom (npr. NordLink između Norveške i Njemačke).
- Integracija obnovljivih izvora energije – Vjetroparkovi na moru (offshore wind farms) koriste HVDC kablove za efikasniji prenos električne energije.
- Interkonekcije između različitih mreža – HVDC može povezivati mreže koje rade na različitim frekvencijama ili imaju različite tehničke karakteristike.
- Podzemni prenos u urbanim sredinama – HVDC kablovi se koriste za prenos velike količine energije kroz gradska područja, gdje nadzemni vodovi nisu mogući.

Najduži i najpoznatiji HVDC kablovi:

NordLink (Norveška - Nemačka) – 623 km podmorskog HVDC kabla, snage 1.400 MW
North Sea Link (Norveška - UK) – 720 km, najduži podmorski HVDC sistem na svijetu
Bipole III (Kanada) – 1.400 km nadzemnog HVDC kabla, snage 2.000 MW
Western HVDC Link (UK) – 422 km, povezuje Englesku i Škotsku podmorskim putem

HVDC kablovi su ključna komponenta modernih elektroenergetskih sistema, omogućavajući efikasan, pouzdan i stabilan prenos električne energije na velikim udaljenostima. Njihova upotreba će rasti sa razvojem obnovljivih izvora energije, podmorskih interkonekcija i potreba za pametnim mrežama (smart grids).

HVDC kablovi imaju specifičnu konstrukciju koja je optimizovana za visoke napone i efikasan prenos električne energije na velike udaljenosti. Njihova konstrukcija zavisi od vrste kabla (ekstrudirani XLPE, impregnisani MI, ili kablovi sa fluidnom izolacijom), ali svi oni imaju zajedničke osnovne slojeve.

Tipičan HVDC kabl se sastoji od sledećih slojeva:

a) Provodnik

- Izrađen od bakarnih ili aluminijumskih žica visoke provodnosti.
- Bakar se koristi za podvodne kablove zbog bolje električne provodljivosti, dok se aluminijum koristi u nadzemnim i podzemnim kablovima zbog manje težine i niže cijene.
- Presjeci provodnika se kreću od 400 mm² do 2.500 mm², u zavisnosti od prenesene snage i udaljenosti.

b) Polimjerna ili papirna izolacija

c) Poluprovodnički sloj

- Obezbeđuje ravnomjernu raspodjelu električnog polja unutar izolacije.

d) Metalni omotač (ekran)

- Izrađen od olova, aluminijuma ili bakra i služi za zaštitu od elektromagnetnih smetnji i mehaničkih oštećenja.
- Olovni omotač se koristi kod podmorskih kablova zbog bolje otpornosti na vlagu.

e) Mehanička zaštita

- Čelične žice ili oklop od čelika štite kabl od mehaničkih oštećenja, posebno kod podvodnih kablova.
- Zaštitni polimjerni omotač štiti kabl od korozije i hemijskih uticaja.

Osnovni parametri koji definišu performanse HVDC kablova su podužna otpornost, kapacitivnost i induktivnost. Kapacitivnost HVDC kabla je manja u odnosu na AC kablove, jer nema efekta promjene polariteta kao kod naizmjenične struje. HVDC kablovi imaju nižu induktivnost od AC kablova, jer nema promjena magnetnog polja.

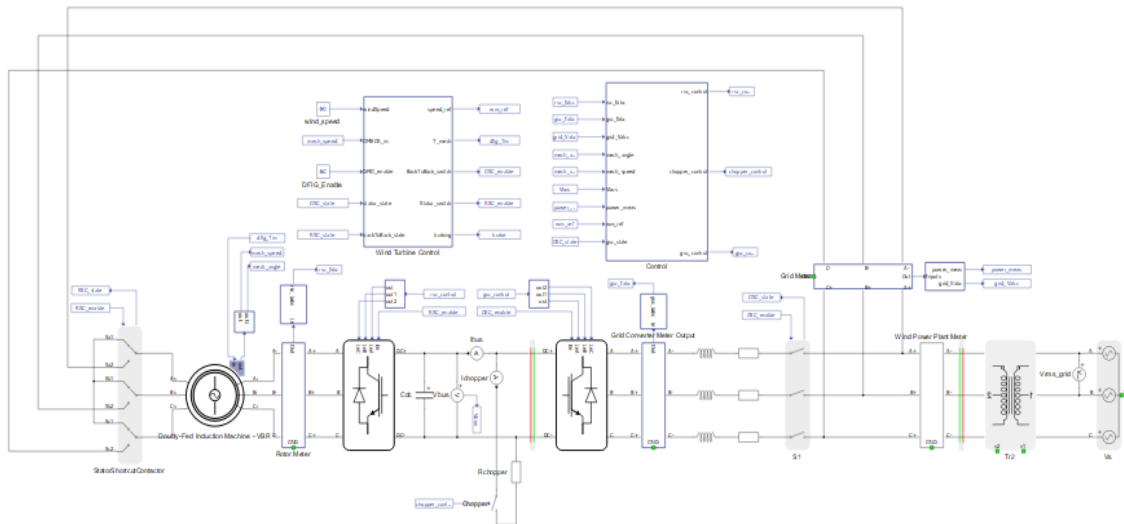


Slika 4: HVDC kabl

3 SIMULACIJA PROIZVODNJE I PRENOSA ENERGIJE HVDC SISTEMOM

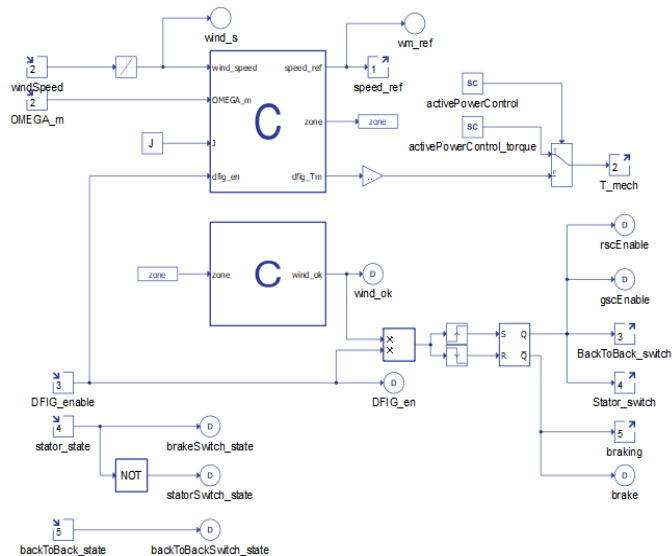
U ovom dijelu je urađena simulacija proizvodnje vjetroelektrane kao jedna cjelina, a prenos i konverzija kao druga cjelina.

3.1.1 Proizvodnja i kontrola električne energije iz vjetroelektrane



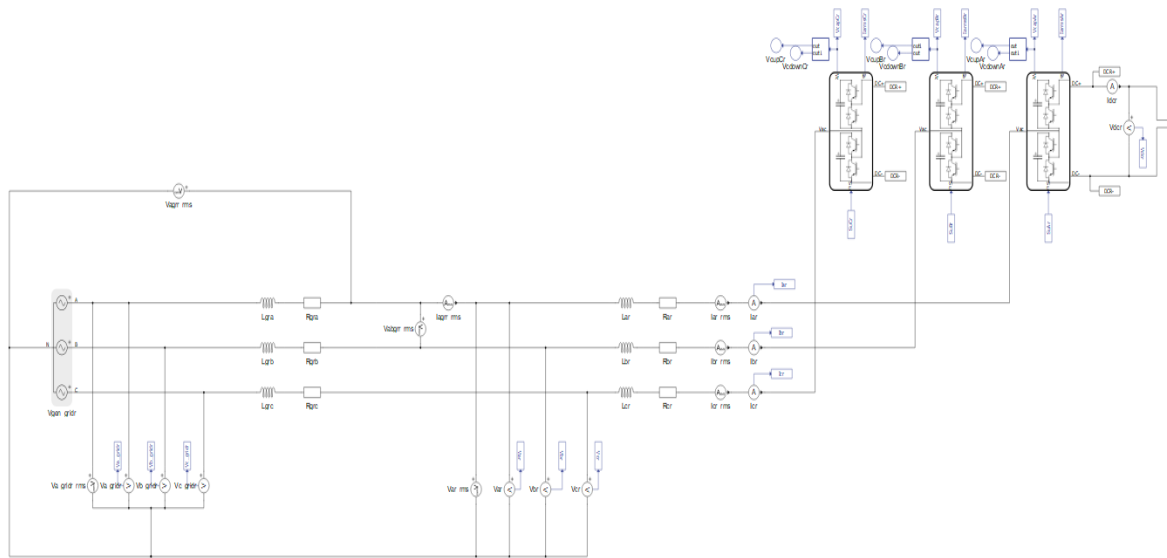
Slika 5: Šema proizvodnje sa kontrolom

Kontrola turbine je urađena preko informacija o brzini vjetra, stanju kontaktora i stanju u mikroprocesoru. Kontrole ispravljača i invertora su urađene preko strujne kontrole, a čopera preko naponske kontrole. Mašina je predstavljena kao dvostrano napajani indukcion generator (DFIG). Standardni napon koji daje vjetrogenerator iznosi 690V. Zbog toga je postavljen transformator koji će da poveća napon za distribuciju ili prenos.



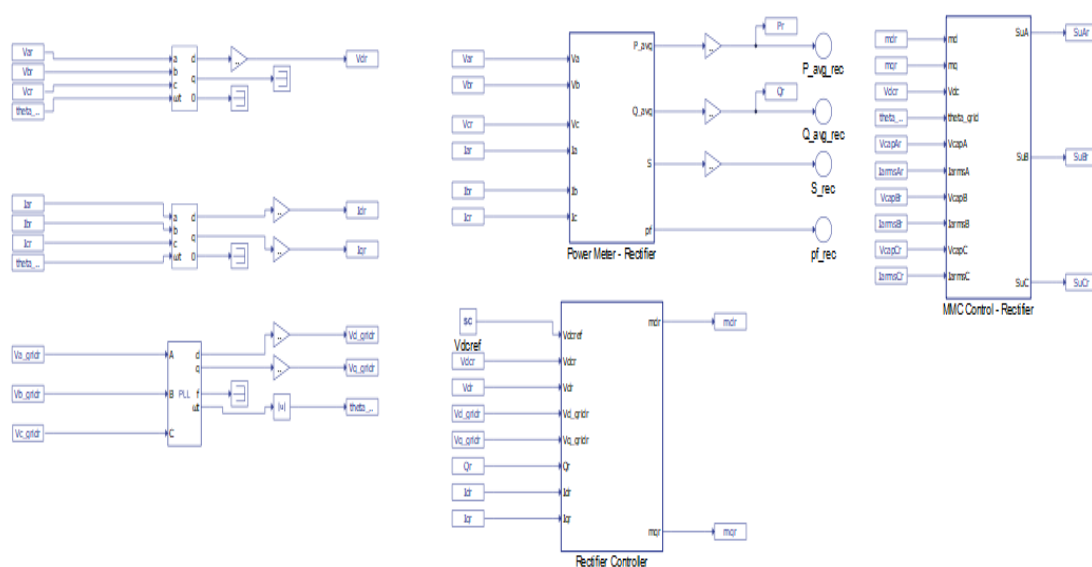
Slika 6: Šema dobijanja referentnih vrijednosti za kontrolu turbine i ispravljača

3.1.2 Prenos i kontrola električne energije u HVDC sistemu

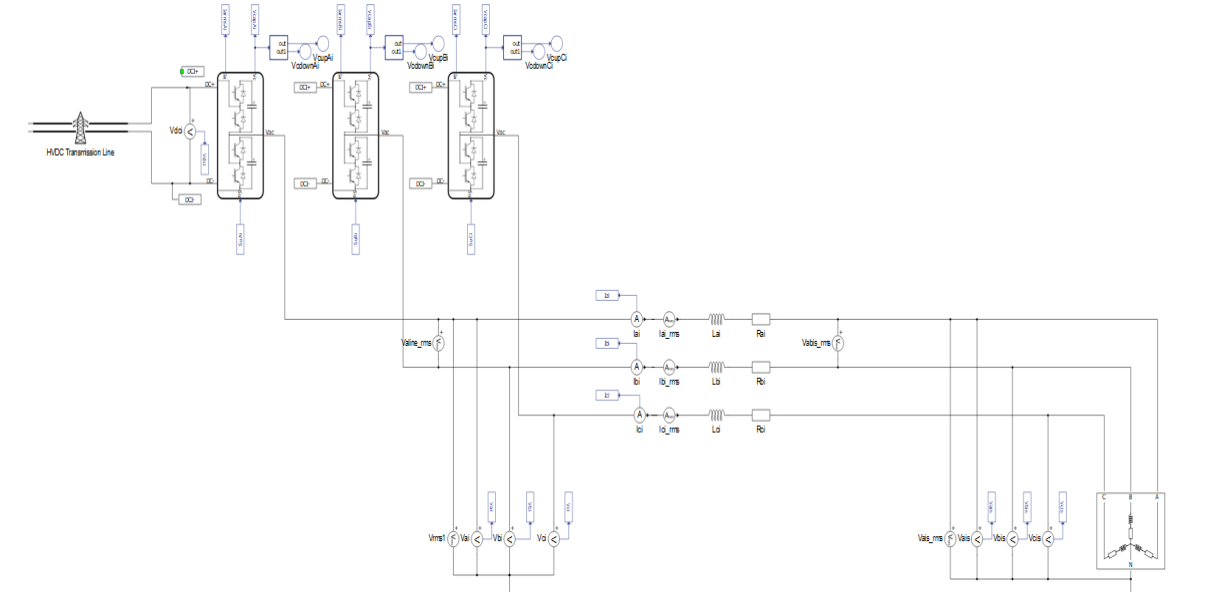


Slika 8: Mreža 230 kV i MMC-ispravljač

Trofazni naponski izvor predstavlja izlaz iz vjetroelektrane ili nekog drugog izvora, a tri grane MMC-a visokonaponski ispravljač koji služi da visoke naizmjenične napone pretvori u visoke jednosmjerne napone za prenos HVDC sistemom prenosa. Kao što je i spomenuto, kod visokonaponskog pretvarača imamo više vrsta kontrole. Iz mjerenih veličina su dobijene snage i faktor snage, kao i transformisane veličine za kontrolu. Kontrola izlazne struje daje ulaze za kontrolu napona na kondenzatorima i cirkularnih struja. Kontrola izlazne struje je urađena preko vektorske kontrole. Kontrola za svaku fazu visokonaponskog pretvarača je urađena dovođenjem referentnog napona DC link-a, mjerene veličine napona DC link-a, kao i struje arm-a i niza vrijednosti napona kondenzatora. Izlazi iz kontrole se vode kao signali za komutaciju prekidača svake faze (tj. svakoj grani).

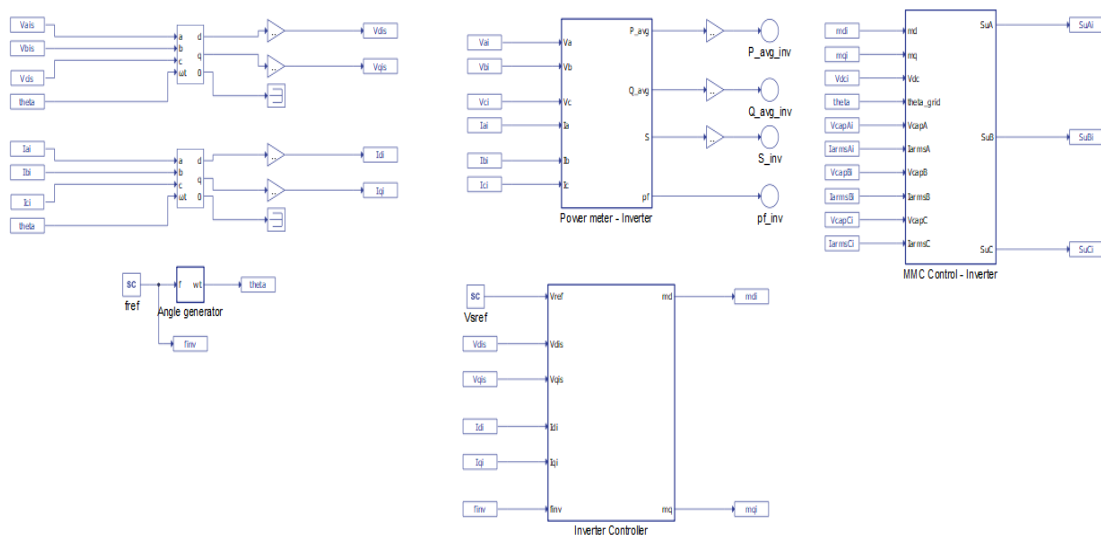


Slika 9: Kontrola MMC ispravljača



Slika 10: HVDC prenos i MMC-invertor

Kontrola visokonaponskog invertora je urađena na sličan način kao kod visokonaponskog ispravljača samo sa drugim mjerenim vrijednostima.

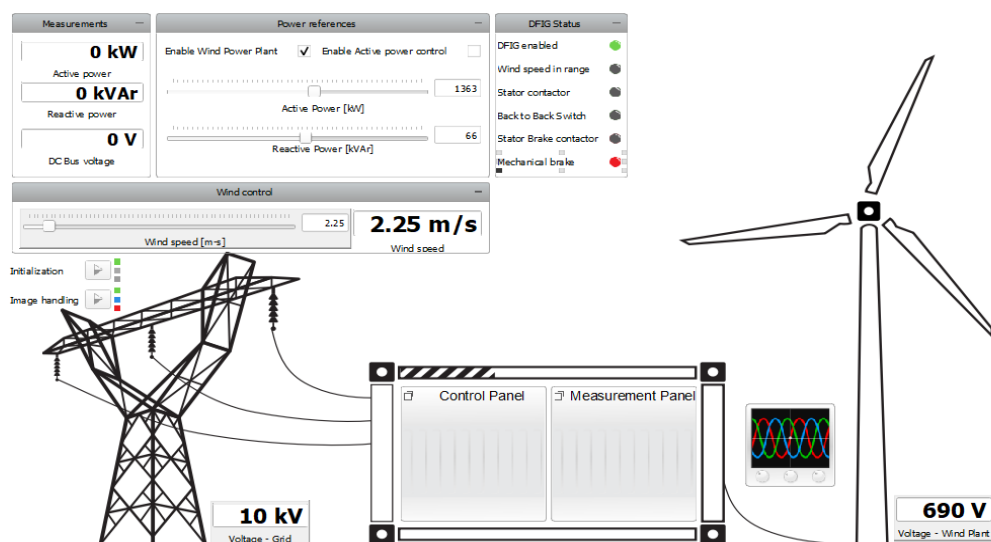


Slika 11: Kontrola MMC invertora

4 REZULTATI SIMULACIJE

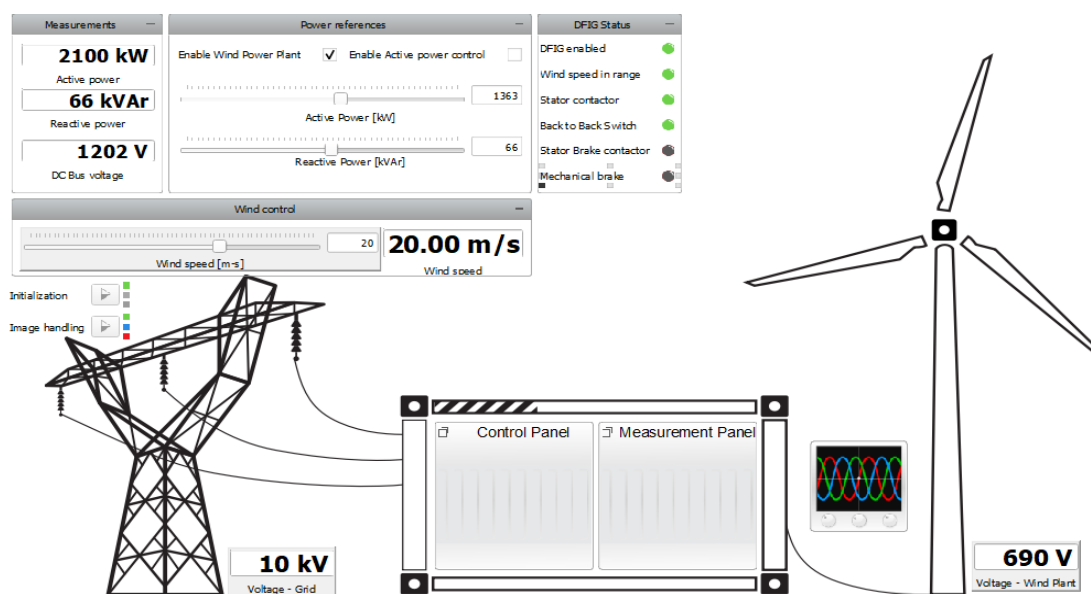
Kao rezultati simulacije prikazani su načini proizvodnje električne energije vjetroelektrana i prenosa visikonaponskim jednosmjernim sistemom. U rezultatima proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana sje prikazana kontrola turbine i kako se u zavisnosti od vjetra turbina uključuje i isključuje. Takođe je prikazano i kako se može regulisati reaktivna snaga. U rezultatima prenosa električne energije je prikazan pad napona između dvije mreže.

4.1.1 Rezultati simulacije proizvodnje



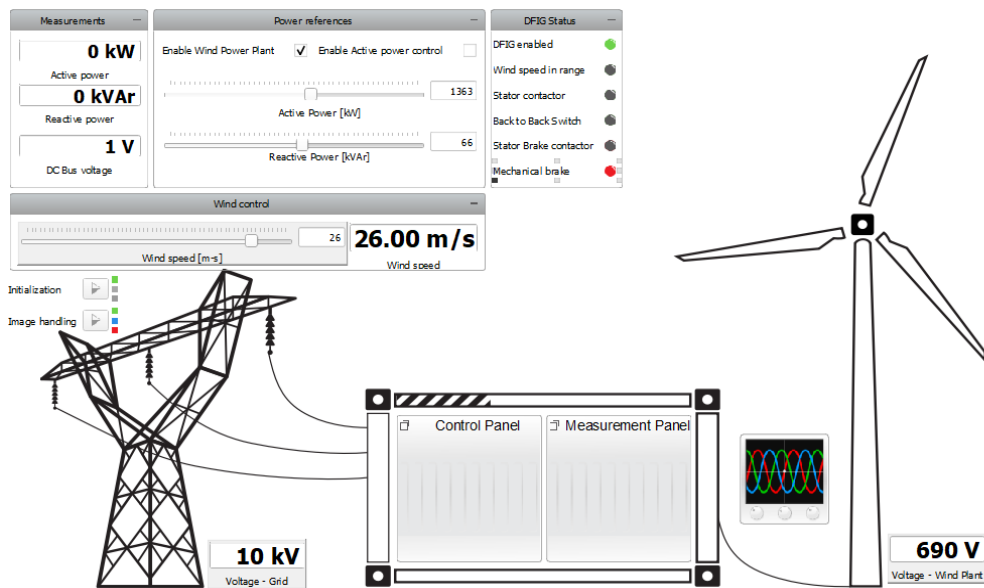
Slika 12: Pokretanje turbine

Ograničenje koje je postavljeno u vidu brzine vjetra do 3 m/s funkcioniše. Turbina se ne okreće i ne proizvodi električnu energiju.



Slika 13: Generisanje snage

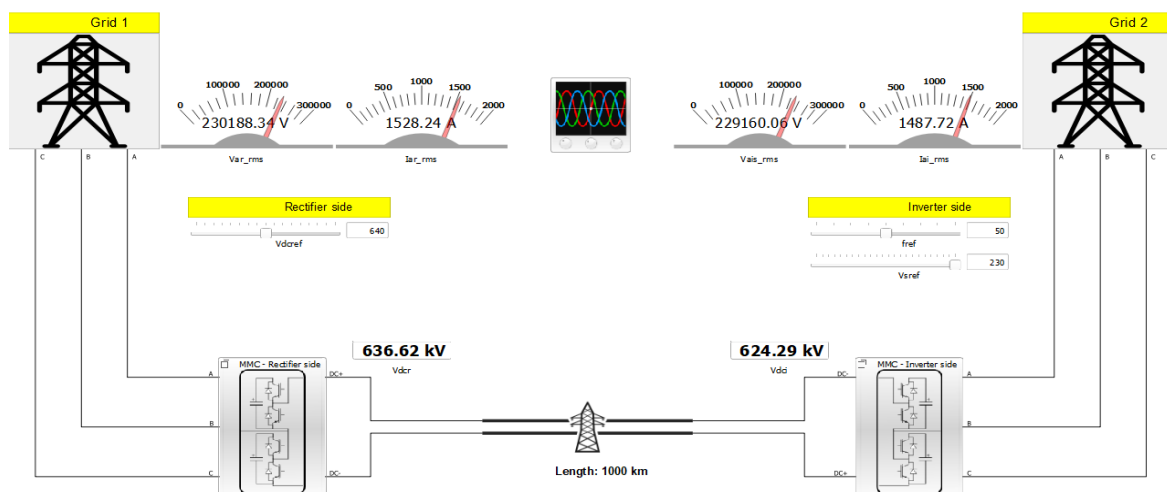
Ovde se primjeti da se referentna vrijednost reaktivne snage prati. Ukoliko se uključi i kontrola aktivne kontrole i ona počinje da se reguliše i prati referencu.



Slika 14: Kočenje turbine

Ograničenje koje je postavljeno od 25 m/s funkcioniše i mehanička kočnica je odreagovala.

4.1.2 Rezultati simulacije prenosa



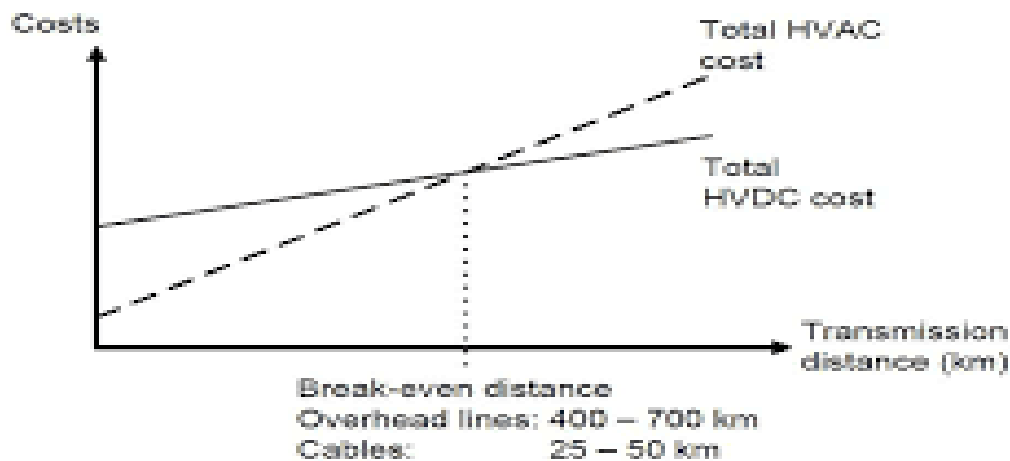
Slika 15: Prenos električne energije HVDC sistemom

Rezultat prenosa električne energije visokonaponskim jednosmjernim sistemom jeste veoma mali pad napona iako je simulacija urađena za dužinu kabla od 1000 kilometara.

5 TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA

Prenos energije visokonaponskim jednosmjernim sistemom (HVDC) u odnosu na visokonaponski naizmjenični sistem prenosa (HVAC) ima nekoliko prednosti u određenim situacijama i aplikacijama. Neke od ključnih prednosti HVDC-a sistema u odnosu na HVAC su:

- Manji gubici pri prenosu na velike udaljenosti: Jedna od najvećih prednosti HVDC sistema je smanjenje gubitaka energije pri prenosu na velikim udaljenostima.
- Pogodan za podvodne kablove: HVDC se često koristi za prenos energije ispod okeana putem podvodnih kablova.
- Precizna kontrola napona: HVDC sistemi omogućavaju precizniju kontrolu napona tokom prenosa energije. To je važno za održavanje stabilnog napona na kraju prenosa.
- Povećana stabilnost mreže: HVDC sistemi mogu pomoći u povećanju stabilnosti elektroenergetske mreže, jer omogućavaju bolju kontrolu nad tokovima energije i mogu se koristiti za kompenzaciju.
- Pogodan za integraciju sa obnovljivim izvorima energije.



Slika 16: Troškovi dva različita sistema prenosa

Inicijalni troškovi su veći kod HVDC sistema zbog pretvaračkih stanica, ali se zbog jeftinijih nadzemnih i kablovskih vodova kod DC prenosa troškovi izjednačavaju na određenoj distanci.

6 ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljen je proces proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana i prenos energije visokonaponskim jednosmjernim sistemom.

Usled rastućeg broja plutajućih vjetroelektrana na velikim udaljenostima od kopna HVDC sistem će biti sve zastupljeniji u prenosu kod takvih aplikacija.

Ono što je važno i za našu zemlju jeste to što se trase koridora za nadzemne vodove sve teže dobijaju, a troškovi kablovskog HVDC sistema su manji od HVAC kablovskog sistema prenosa, te bi implementacija HVDC sistema predstavljala budućnost u prenosu. Naravno, visokonaponska energetska elektronika se razvija i pokušavaju da se razviju najbolji sistemi kontrole i dizajna. Iz tog razloga, potrebno je analizirati uticaj iste na sistem prenosa, odnosno kontrolu tokova snage, padove napona, uticaj na funkcionisanje relejne zaštite i drugo.

7 ZAHVALNICA

Za pomoć i savjete oko izrade rada, najsrdačnije bih se zahvalio profesoru Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, Milovanu Majstoroviću koji me je inspirisao da povežem elektroenergetske sisteme i pogone i pretvarače u jednu cjelinu. Takođe, želim da se zahvalim firmi „Global Substation Solutions" koja mi je pružila prostor da se razvijam i napredujem i omogućila prisustvo na savjetovanju.

8 LITERATURA

- [1] Đurišić Željko, Vjetroelektrane, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2015
- [2] Radaković Zoran, Jovanović Milan, Specijalne električne instalacije, Univerzitet u Beogradu, 2008
- [3] KTH Computer Science and Communication, Doubly-fed Induction Generator Modeling and Control in DigSilent Power Factory
- [4] Sharifabadi et al. - 2016 - Design, Control, and Application of Modular Multilevel Converters for HVDC Transmission Systems , First Edit
- [5] Global Wind Energy Council : <https://www.gwec.net/policy/offshorewind>