

DOI: [10.46793/CIGRE37.B4.01](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.B4.01)**B4.01****HVDC PRENOSNE MREŽE – KARAKTERISTIKE ODABRANIH ELEMENATA I
UPOREDNA ANALIZA SA EKVIVALENTNIM ELEMENTIMA U HVAC PRENOSNIM
MREŽAMA****HVDC TRANSMISSION NETWORKS – CHARACTERISTICS OF SELECTED
COMPONENTS AND COMPARATIVE ASSESSMENT WITH EQUIVALENT
COMPONENTS IN HVAC TRANSMISSION NETWORKS****Marija Tomić, Vladimir Antušević, Todor Šiljegović***

Kratak sadržaj: Rad se bavi analizom ključnih karakteristika HVDC (High Voltage Direct Current) tehnologije u prenosnim mrežama, s posebnim fokusom na nadzemne vodove i kablovske sisteme. Pored osnovnih principa HVDC prenosa, analiziraju se njegove prednosti i ograničenja u odnosu na konvencionalne HVAC (High Voltage Alternating Current) mreže, uz uporednu analizu tehničkih i ekonomskih faktora. U radu su prikazani primeri proračuna koji ilustruju ključne aspekte rada HVDC sistema, kao i razlike u odnosu na ekvivalentne proračune u HVAC mrežama zasnovane na realnim elektroenergetskim sistemima. Dodatno, dat je osvrt na karakteristike HVDC mreža iz perspektive sistemskih studija, uključujući analizu karakterističnih režima rada. Prikazane su razlike u ponašanju HVAC i HVDC mreža u uslovima poremećaja, uz procenu njihovog uticaja na pouzdanost i stabilnost elektroenergetskog sistema. Cilj rada je da kroz date tehničke analize i proračune doprinese boljem razumevanju funkcionisanja HVDC tehnologija u prenosnim sistemima, kao i kvantifikacije razlika u odnosu na rezultate ekvivalentnih proračuna za HVAC mreže.

Ključne reči: HVDC, prenosni sistem, visokonaponski dalekovod, visokonaponski kabl

Abstract: This paper analyzes the key characteristics of HVDC (High Voltage Direct Current) technology in transmission networks, with a particular focus on overhead lines and cable systems. In addition to discussing the fundamental principles of HVDC transmission, the paper examines its advantages and limitations compared to conventional HVAC (High Voltage Alternating Current) networks, providing a comparative analysis of technical and economic factors. Calculation examples are presented to illustrate key aspects of HVDC system operation and highlight differences from equivalent calculations in HVAC networks, based on real-world power systems. Furthermore, the paper provides insights into the dynamic performance of HVDC networks from a power system analysis perspective, including steady-state and transient operating conditions. Comparative evaluations of HVAC and HVDC network responses under fault conditions are conducted, with an emphasis on their impact on system reliability and stability. The objective of this paper is to contribute to a better understanding of HVDC

* Marija Tomić, GMS Consult doo, mtomic@gms-consult.com

Vladimir Antušević, GMS Consult doo, vantusevic@gms-consult.comTodor Šiljegović, Go2Power Consulting, todor.siljegovic@go2power.eu

technology in transmission systems through technical analyses and calculations, as well as to quantify differences compared to equivalent calculations for HVAC networks.

Key words: HVDC, transmission system, HV overhead line, HV underground cable

1 UVOD

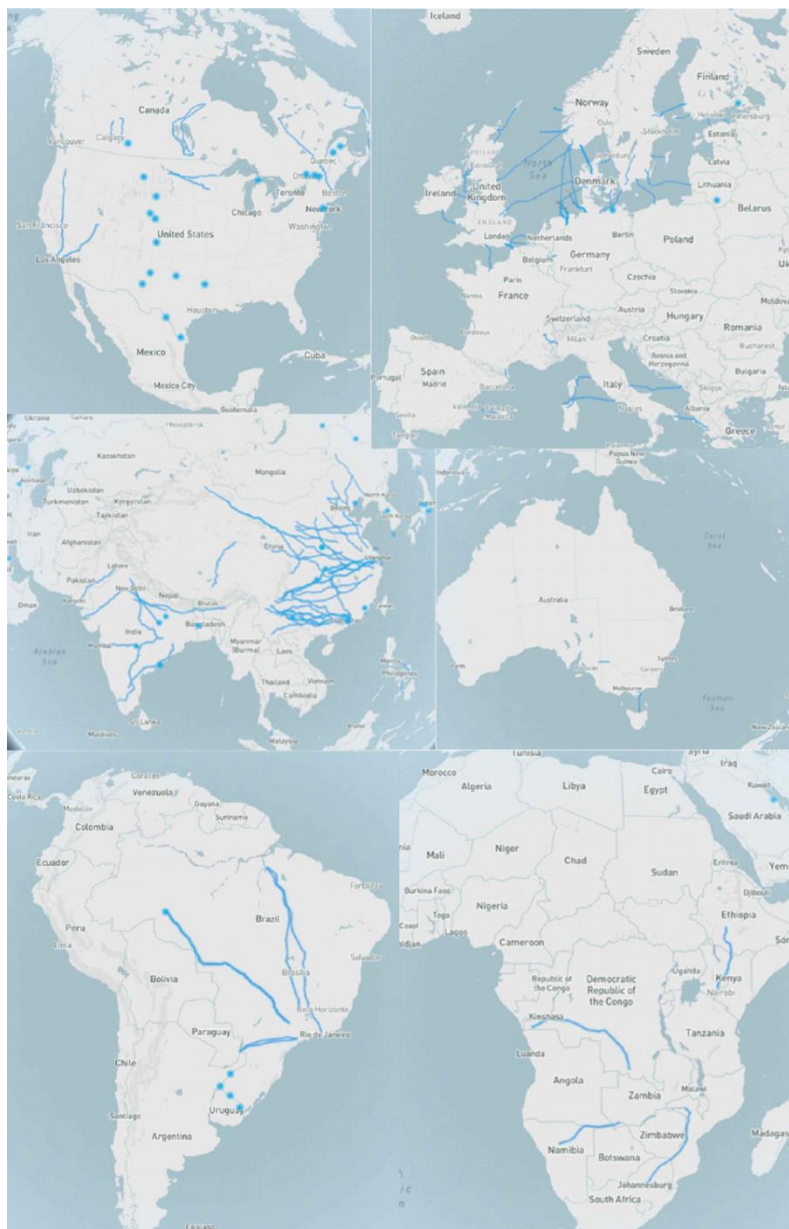
Ubrzani razvoj elektroenergetskog sektora poslednjih decenija uslovljen je rastućim zahtevima za pouzdano, efikasno i ekološki održivo snabdevanje električnom energijom. Savremene elektroenergetske mreže predstavljaju kompleksne i dinamične sisteme koji integrišu konvencionalne elektrane, obnovljive izvore energije, skladišta energije i napredne metode upravljanja potrošnjom. U cilju povećanja stabilnosti, smanjenja gubitaka i omogućavanja prenosa velike količine električne energije na dugim relacijama, sve češće se koristi tehnologija jednosmernog prenosa električne energije (*High Voltage Direct Current* – HVDC). Pored toga, HVDC tehnologije mogu igrati ključnu ulogu u tranziciji ka *low carbon* elektroenergetskom sistemu, što predstavlja jedan od prioriteta savremenog društva.

Glavne prednosti HVDC prenosa u odnosu na HVAC prenos:

- Asinhrona veza – omogućava povezivanje dva AC sistema različitih frekvencija
- Prevazilaženje tehničkih ograničenja u prenosu – HVDC može obezbediti prenos putem dugih kablovskih sistema, što AC sistemi ne mogu zbog visoke kapacitivnosti kablova, koja uzrokuje značajane kapacitivne struje, odnosno protok reaktivne snage, smanjujući tako efektivni kapacitet za prenos aktivne snage
- Nema povećanja kratkospojne snage prilikom povezivanja sistema – nije potrebno nadograđivati zaštitnu opremu
- Kontrolisani prenos aktivne snage – nezavisan od impedanse, napona i frekvencije, omogućavajući precizno ispunjenje unapred definisanih kriterijuma snabdevanja
- Niži gubici
- Veći prenos snage za istu konfiguraciju voda
- Nema ograničenja dužine prenosa u pogledu stabilnosti sistema
- Bolja regulacija napona – zbog odsustva reaktivnog pada napona, pri visokim i niskim opterećenjima (nema *Ferrantijevog* efekta)
- Uži koridor za izgradnju vodova – omogućava efikasniju upotrebu prostora
- Napredne kontrolne funkcije poboljšavaju stabilnost AC sistema na koje su povezani i mogu služiti kao brza rezerva proizvodnje.

Iako se rešenja za prenos velike količine električne energije putem HVDC prenosa komercijalno razvijaju i primenjuju već nekoliko decenija, poslednjih godina beleži se značajan porast broja HVDC projekata.

Na sledećim mapama prikazani su HVDC objekti u radu širom sveta.



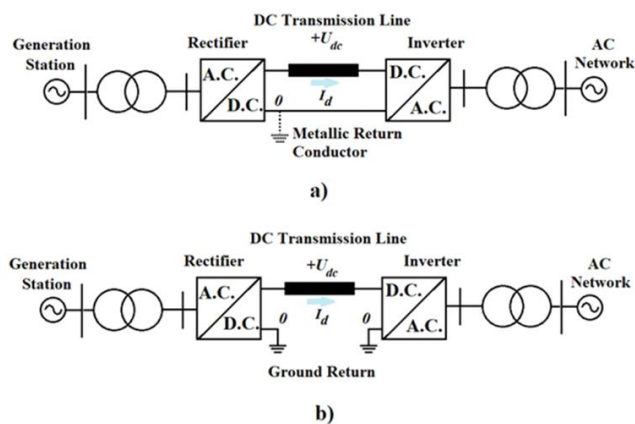
Slika 1: HVDC projekti u radu širom sveta

1.1 Osnovni principi prenosa u HVDC mrežama

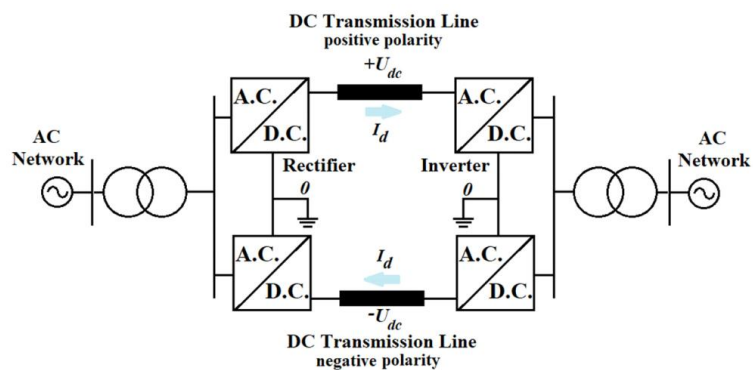
Tehnologija HVDC pretvarača obuhvata dve glavne koncepcije: samokomutirane naponski kontrolisane pretvarače (VSC – *Voltage Source Converters*) koji koriste IGBT tranzistore i konvencionalne linijski komutirane pretvarače, odnosno mrežom vođene pretvarače (*LCC – Line Comutated Converters*), poznate i kao pretvarače sa strujnim ulazom (*Current Surce Converters*) koji koriste tiristore, kao i različite moguće konfiguracije. Pored toga, između konvertorskih stanica mogu se koristiti različite tehnologije kablova i nadzemnih vodova.

Za visokokapacitivne prenosne veze kao i prenos na velike udaljenosti, CSC-HVDC tehnologija pruža veću efikasnost i veći kapacitet prenosa snage u poređenju sa klasičnim HVAC rešenjima. U slučajevima prenosa električne energije sa vetroparkova na moru ili iz drugih udaljenih oblasti sa ograničenim prostorom, VSC-HVDC predstavlja efikasniju tehnologiju, jer omogućava kontrolu aktivne i reaktivne snage na visokom nivou.

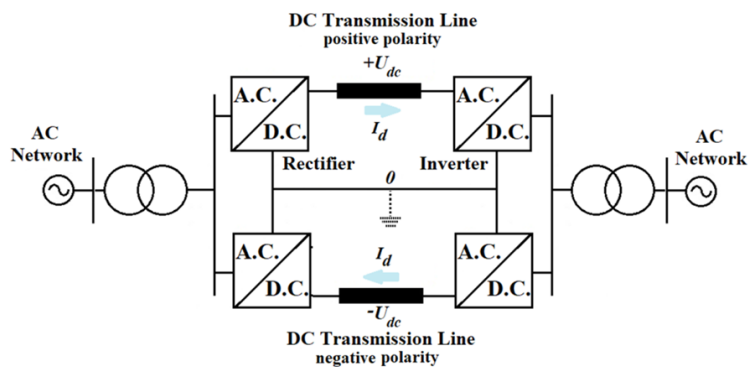
Na sledećim slikama prikazane su najčešće konfiguracije pretvarača koje se mogu koristiti pri izradi HVDC mreže. Ove konfiguracije su nezavisne od primene VSC ili LCC tehnologije pretvarača.



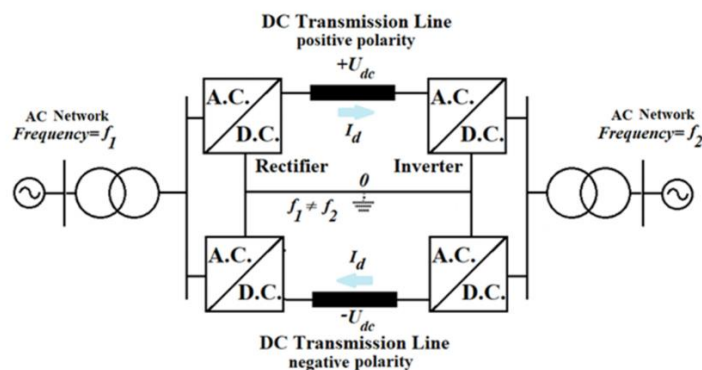
Slika 2: HVDC monopolarna konfiguracija a) sa neutralnim provodnikom b) sa povratkom neutralne struje kroz zemlju



Slika 3: HVDC bipolarna konfiguracija - povratni pute neutralne struje kroz zemlju



Slika 4: HVDC bipolarna konfiguracija - sa neutralnim provodnikom



Slika 5: HVDC back-to-back konfiguracija

Za prenos na velike udaljenosti, bipolarni režim koji ima i pozitivne i negativne provodnike je standard, zbog povećane pouzdanosti i smanjenih gubitaka. Takođe, korišćenje dva monopolarna voda treba uzeti u obzir zbog veće pouzdanosti, uprkos povećanju cene voda u odnosu na bipolarni.

2 PRENOSNI VODOVI U HVDC MREŽAMA – KARAKTERISTIKE I UPOREDNI PRIKAZ EKVIVALENTNIH PARAMETARA VODOVA U HVAC MREŽAMA

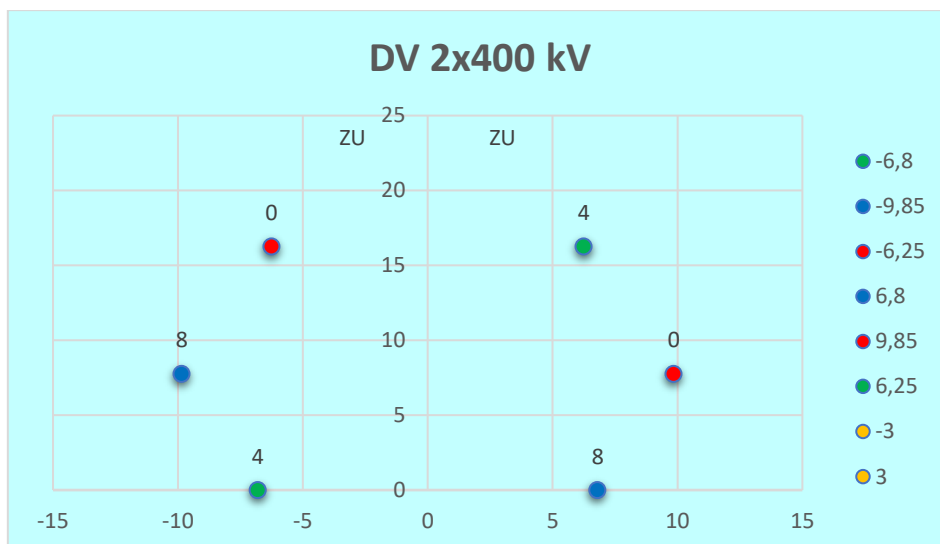
Osnovne razlike u karakteristikama HVDC i HVAC prenosnih vodova potiču od same prirode prenosa električne energije jednosmernom i naizmeničnom strujom, odnosno usled sinusoidalne vremenske promenljivosti struje i napona u HVAC sistemima i konstantnih, vremenski nepromenljivih struje i napona u HVDC sistemima.

2.1 Visokonaponski nadzemni vodovi

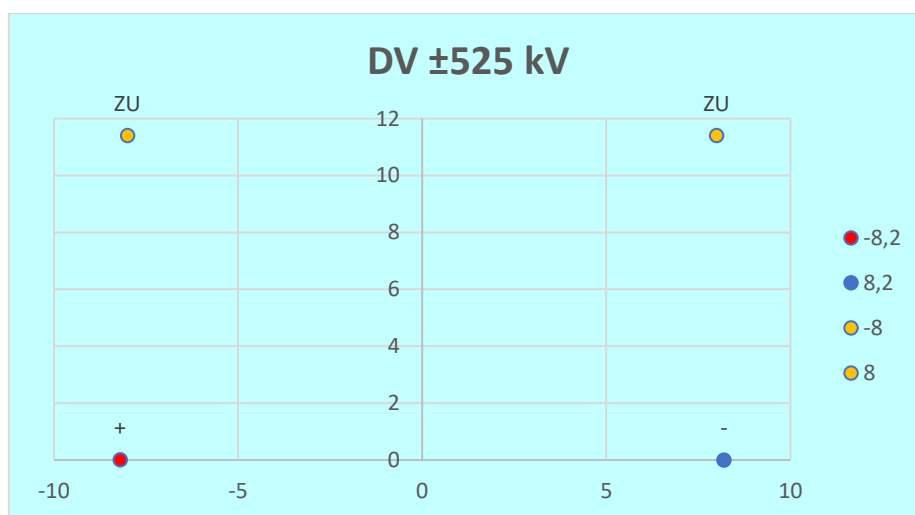
Projektovanje HVDC nadzemnih vodova u mnogim aspektima je slično projektovanju HVAC nadzemnih vodova. Vizuelna razlika je u tome što je većina HVDC dalekovoda povezana na bipolarne pretvarače i stoga koristi samo dva provodnika, jedan za pozitivni pol i drugi za negativni pol. Neki HVDC dalekovodi uključuju i neutralni provodnik u slučajevima kada nije dozvoljeno provođenje neutralne struje kroz zemlju između povezanih konvertorskih stanica.

U poređenju sa širinom koridora kod HVAC dalekovoda istog prenosnog kapaciteta, HVDC dalekovodi najčešće imaju znatno užu koridor zbog manjeg fizičkog zauzeća prostora usled manjeg broja provodnika, kao i niže emisije elektromagnetnog zračenja čime se redukuje i širina zaštitne zone. HVAC sistemi emituju promenljiva elektromagnetna polja, koja zahtevaju veće sigurnosne razmake, mogu izazvati smetnje u komunikacionim sistemima i zabrinutost po zdravlje. HVDC sistemi emituju statička električna i magnetna polja, koja su manje intruzivna i lakša za upravljanje i ekraniranje. To znači da izgradnja HVDC nadzemnog voda može biti ekonomski isplativija od ekvivalentnog HVAC voda, što delimično kompenzuje visoke troškove HVDC konvertorskih stanica koje vod povezuje.

Za potrebe uporednog prikaza odabranih parametara visokonaponskih nadzemnih vodova odabran je dvostruki HVAC dalekovod 2x400 kV sa dva Al/Če 490/65 mm² provodnika u snopu na rastojanju od 40 cm, rasporeda provodnika u glavi stuba kao što je prikazano na Slici 6 i bipolarni HVDC dalekovod ±525 kV sa tri AAAC ASTER 570 u snopu na rastojanju od 45 cm, rasporeda provodnika u glavi stuba kao što je prikazano na Slici 7.



Slika 6: Raspored provodnika u glavi stuba za DV 2x400 kV



Slika 7: Raspored provodnika u glavi stuba za DV ±525 kV

Proračuni su urađeni za visine provodnika iznad tla od 12 m.

2.1.1 Prenosni kapacitet

Kao što je već napomenuto, većina HVDC dalekovoda je povezana na bipolarne pretvarače i stoga koristi samo dva provodnika ili dva snopa provodnika, jedan za pozitivni pol i drugi za negativni pol. Neki HVDC dalekovodi uključuju i neutralni provodnik u slučajevima kada nije dozvoljeno provođenje neutralne struje kroz zemlju između povezanih konvertorskih stanica. Povrat neutralne struje kroz zemlju ima prednosti u vidu nižih gubitaka, a u slučaju dužeg perioda izgradnje nije neophodno odmah postaviti drugi provodnik. Međutim, u nekim slučajevima, posebno u gusto naseljenim oblastima, koristi se metalni povrat neutralne struje, odnosno neutralni provodnik, kako bi se izbegle neutralne struje kroz zemlju.

Strujna nosivost provodnika primenjenih na HVAC i HVDC dalekovoda se proračunava na isti način uz isključivanje površinskog efekta (*skin effect*) kod provodnika na HVDC dalekovodima. Kod provodnika primenjenih na HVAC dalekovodima struja teži da teče više po površini provodnika, zbog stalne promene smera struje.

To efektivno smanjuje poprečni presek kroz koji struja zaista protiče što doprinosi manjoj strujnoj nosivosti, odnosno većim gubicima. Kod provodnika primenjenih na HVDC dalekovodima nema promene smera struje, odnosno nema površinskog efekta i struja teče ravnomerno kroz ceo presek provodnika što doprinosi većoj efektivnoj strujnoj nosivosti. Provodnici primenjeni na HVAC dalekovodima se zbog površinskog efekta greju više po površini, pa je hlađenje efikasnije, ali je ukupna nosivost ograničena. Provodnici primenjeni na HVDC dalekovodima se greju ujednačenije, pa se može preciznije modelovati temperatura provodnika i bolje iskoristiti materijal.

Kod provodnika primenjenih na HVAC dalekovodima, efekat korone, odnosno gubici zbog jonizacije vazduha oko provodnika su izraženiji, zbog oscilacija napona, što utiče na projektovana rastojanja i gubitke. I na provodnicima HVDC vodova postoji korona, ali je manje izražena pri istoj efektivnoj vrednosti napona, čime se omogućava i manje rastojanje između provodnika, pa je prenos efikasniji.

U našem elektroenergetskom sistemu, u Srbiji, dalekovodi koji imaju najveću prenosnu moć su dvosistemske 400 kV dalekovodi sa dva provodnika Al/Če 490/65 mm² po fazi, kao što je i HVAC dalekovod koji je analiziran u ovom radu. Njihova prenosna moć je 3199.5 MW. Prenosna moć analiziranog ±525 kV dalekovoda, koji zauzima znatno manji koridor u prostoru u odnosu na pomenuti 2x400 kV dalekovod, je 3352.2 MW.

2.1.2 Izolatori

Jednosmerno električno polje koje generišu HVDC vodovi ima značajan uticaj na integritet dielektričnih materijala, koji su prvobitno razvijani za AC primene. Već u ranim godinama eksploatacije prvih HVDC dalekovoda postalo je jasno da su potrebni specijalno prilagođeni dielektrici kako bi se obezbedila pouzdanost i dugotrajnost izolacionih sistema.

Izolacija kod postojećih HVAC dalekovoda uglavnom je zasnovana na performansama u pogledu sklopnih prenapona (*slow-front overvoltages*), koji određuju razmak između rogova (*arcing distance*) na izolatorskim lancima. Za datu dužinu izolatora, zahtevi u pogledu otpornosti na zagađenje se obično ispunjavaju izborom izolatora sa odgovarajućom dužinom puzne staze. U HVDC sistemima, nivoi sklopnih prenapona su znatno niži, te je projektovanje izolatora često određeno zahtevima otpornosti na zagađenje. Zagađenje izolatora je značajnije ograničenje za HVDC vodove, jer se na izolatorima pod jednosmernim naponom nakuplja više zagađenja nego kod onih pod naizmeničnim, što povećava rizik od površinskog proboja.

Specifični zahtevi za dielektrike mogu se sumirati kroz dva ključna kriterijuma od suštinskog značaja za sprečavanje degradacije:

- Jonska migracija
- Termički proboj

Naponski stres je stalni i ravnomerno raspoređen duž izolatora koji se primenjuju na HVDC vodovima, dok jednosmerno električno polje uzrokuje jonsku migraciju u izolacionim materijalima, što može dovesti do degradacije. Kod izolatora primenjenih na HVAC vodovima nema stalne jonske migracije, ali postoji rizik od koronskih pražnjenja i efekta starenja materijala zbog stalne promene polariteta.

Za dielektrike, upotreba isključivo visoko-otpornog materijala postala je obavezan kriterijum, usled iskustava sa probojem porcelanskih i staklenih članaka u ranim HVDC primenama.

Pored odgovarajuće vrednosti otpornosti, dielektrični materijal mora imati izuzetnu čistoću i homogenost, čime se obezbeđuje dugotrajna stabilnost izolacionih svojstava.

U novije vreme se na HVDC dalekovodima sve više koriste kompozitni izolatori zbog specifičnih prednosti u poređenju sa tradicionalnim staklenim ili porcelanskim izolatorima. Kompozitni izolatori imaju veću otpornost na zagađenje i hidrofobnost, manju masu i niži rizik od pucanja usled mehaničkih ili termičkih naprezanja.

Rizik od elektrohemijske korozije je bitno uvažiti za izolatore primenjene na HVDC vodovima. Jednosmerno električno polje privlači čestice iz vazduha, što dovodi do formiranja sloja zagađenja, nezavisno od specifičnih faktora kontaminacije iz okruženja. Iz tog razloga su izolatorski lanci koji se primenjuju na HVDC vodovima neretko duži u odnosu na izolatorske lance koji se primenjuju na ekvivalentnim HVAC vodovima. Kako se najveća degradacija javlja na spojnoj i ovesnoj opremi, izolatorski lanci su opremljeni cinkovom oblogom na metalnim elementima kako bi se sprečila korozija.

Za analizirani HVAC 2x400 kV dalekovod proračunom je dobijeno da je za prvi stepen zagađenja odnosno za nazivnu dužinu strujne staze od 16 mm/kV potrebno 20 izolatorskih članaka U160BS strujne staze 350 mm što rezultira dužinom izolatorskog lanca od 2.92 m i ukupne strujne staze 6720 mm. Za ekvivalentni HVDC 400 kV dalekovod, uz primenu istih izolatorskih članaka i u istim uslovima zagađenja bilo bi potrebno ugraditi 31 izolatorski članak što bi rezultiralo dužinom izolatorskog lanca od 4.516 m.

2.1.3 Korona

Kada se određeni naponi primene na provodnike dalekovoda, na njihovoj površini se javlja električno polje, odnosno naponski gradijent. Ukoliko napon na površini provodnika premaši određeni prag, poznat kao kritični napon za pojavu korone, dolazi do koronskih pražnjenja.

Pražnjenja usled korone izazivaju niz efekata, među kojima su:

- Gubici usled korone,
- Buka,
- Radio smetnje,
- Vidljiva korona, odnosno plavičasti sjaj.

Korona na provodnicima, a samim tim i njeni neželjeni efekti, zavisi od više faktora, uključujući:

- Naponski nivo dalekovoda,
- Visinu i konfiguraciju snopa provodnika,
- Rastojanje između faza ili polova,
- Meteorološke uslove (temperatura, pritisak, vlažnost, vetar, kiša itd.),
- Prisustvo organskih ili neorganskih zagađivača na provodnicima.

Zbog svega navedenog, pri projektovanju dalekovoda neophodno je pažljivo optimizovati sve ove parametre kako bi se minimizovala pojava korone i njenih efekata.

2.1.3.1 Površinski naponski gradijent provodnika

Parametar koji ima najznačajniji uticaj na pojavu korone jeste električno polje na površini provodnika, poznato kao površinski naponski gradijent provodnika. Za izračunavanje električnog polja na provodnicima HVDC dalekovoda koriste se elektrostatički principi.

Ukoliko se na svakom polu HVDC dalekovoda koristi po jedan provodnik, električno polje se raspoređuje gotovo ravnomerno duž površine provodnika. Za bipolarni HVDC dalekovod sa jednim provodnikom po polu, prosečan i maksimalni površinski gradijent provodnika, zavise od primenjenog napona, rastojanja između polova, kao i poluprečnika i visine provodnika. Kada se koriste snopovi provodnika, električno polje oko pojedinačnih provodnika unutar snopa raspoređeno je neravnomerno. Maksimalni i minimalni naponski gradijenti javljaju se na dijametralno suprotnim tačkama na površini provodnika, dok se prosečni gradijent javlja na tački između njih. Stepenn neravnomernosti povećava se sa brojem provodnika u snopu i odnosom poluprečnika provodnika prema radijusu snopa.

Koristeći metod poznat kao *Markt i Mengele* metod, moguće je izračunati prosečan i maksimalan površinski gradijent snopa za bipolarni HVDC vod sa snopovima od n provodnika na svakom polu. Ove jednačine daju tačne rezultate za maksimalni gradijent snopa sa greškama koje ne prelaze 2% za broj provodnika u snopu ≤ 4 . Međutim, za slučajeve sa $n > 4$, potrebne su preciznije metode, kao što je metoda sukcesivnih slika, kako bi se dobili tačniji rezultati.

Primenom pomenutog metoda, proračunom je dobijeno da maksimalni površinski naponski gradijent provodnika na analiziranom HVDC dalekovodu iznosi 27.82 kV/cm, dok je za analizirani HVAC dalekovod ta vrednost 18.45 kV/cm.

2.1.3.2 Početni gradijent korone

Kada električno polje na površini provodnika dalekovoda premaši određenu vrednost, dolazi do delimičnog električnog proboja okolnog vazduha, što dovodi do pojave koronskih pražnjenja.

Pojava koronskih pražnjenja u neposrednoj blizini provodnika dovodi do brojnih koronskih efekata koji značajno utiču na projektovanje dalekovoda. Koronski efekti koji se uobičajeno uzimaju u obzir pri projektovanju i HVAC i HVDC dalekovoda su gubici usled korone, radio interferencija i buka. U slučaju HVDC dalekovoda, mora se takođe uzeti u obzir kombinovano delovanje jednosmernih električnih polja i jonskih struja izazvanih koronom na nivou tla, kao deo parametara za projektovanje dalekovoda. Iako korona na dalekovodima stvara ozon, istraživanja na eksperimentalnim i dalekovodima u pogonu pokazala su da je doprinos ukupnom nivou ozona u atmosferi gotovo zanemarljiv.

Električno polje na površini provodnika pri kojem dolazi do početka koronskih pražnjenja definiše se kao početni gradijent korone. Početni gradijent korone za određeni provodnik zavisi od više faktora, među kojima su najvažniji poluprečnik provodnika, stanje njegove površine i gustina okolnog vazduha. Takođe zavisi i od tipa napona koji se primenjuje na provodnik – naizmenični ili jednosmerni, a u slučaju jednosmernih napona i od polariteta.

Na osnovu rezultata ispitivanja sprovedenih na više glatkih cilindričnih provodnika malog prečnika, *Whitehead* je izveo empirijsku formulu za početni gradijent korone na HVDC vodovima u kojoj, pored navedenih parametara figurišu i empirijske konstante kojima se razlikuju vrednosti početnog gradijenta korone na pozitivnom i negativnom polu. Prema vrednostima ovih konstanti vidi se da pojava korone započinje na negativnom polu pri nižem gradijentu napona. Kod HVAC vodova korona se javlja pri vršnim vrednostima napona u obe periode dok je kod HVDC vodova stalna.

Proračunom je dobijeno da je na analiziranom HVDC dalekovodu početni gradijent korone na negativnom polu 28.7 kV/cm, dok je na analiziranom HVAC dalekovodu proračunom dobijena vrednost 21.98 kV/cm.

2.1.3.3 Gubici usled korone

Gubici usled korone na HVAC i HVDC dalekovodima nastaju zbog kretanja pozitivnih i negativnih jona koje stvara korona. Međutim, postoje osnovne razlike u fizičkim mehanizmima koji su uključeni u gubitke usled korone kod HVAC i HVDC dalekovoda.

Na HVAC vodovima, pozitivni i negativni joni stvoreni koronom podležu oscilatornom kretanju u naizmeničnom električnom polju prisutnom oko provodnika i stoga su ograničeni na vrlo uzak prostor oko provodnika. Na HVDC vodovima joni iste polarizacije kao provodnik se udaljavaju od njega, dok se joni suprotne polarizacije privlače ka provodniku i neutralizuju pri kontaktu sa njim. Tako pozitivni provodnik u režimu korone deluje kao izvor pozitivnih jona koji ispunjavaju čitav prostor između provodnika i zemlje, dok negativni provodnik ima obrnut efekat. Unipolarna prostorna naelektrisanja ispunjavaju prostor između svakog pola i zemlje, dok se joni obe polarizacije mešaju u bipolarnoj zoni između dva pola i podležu određenom stepenu rekombinacije.

Teorijsko izračunavanje gubitaka usled korone kod HVDC dalekovoda zahteva analizu složenog električnog polja i raspodele prostornih naelektrisanja u unipolarnim i bipolarnim zonama. Ova analiza najpre određuje raspodelu električnog polja i jonskih struja na površini provodnika i na zemlji, a zatim se na osnovu toga procenjuju gubici usled korone. Spoljni vremenski uslovi imaju veliki uticaj na gubitke, oni su manji po lepom vremenu nego po nepovoljnim vremenskim uslovima kao što su kiša, mraz i sneg. Ipak, odnos gubitaka usled korone po lošem vremenu u odnosu na gubitke pri lepom vremenu kod HVDC vodova je znatno manji nego kod HVAC vodova.

Zbog složenosti teorijskih proračuna i velikog broja faktora koji utiču na koronu kod praktičnih HVDC dalekovoda, često je pogodnije koristiti empirijske formule koje su izvedene na osnovu velike količine podataka dobijenih dugoročnim merenjima gubitaka na eksperimentalnim vodovima sa različitim snopovima provodnika i u različitim vremenskim uslovima. Za bipolarne HVDC dalekovode, razvijene su određene empirijske formule za procenu gubitaka usled korone u različitim godišnjim dobima i pod različitim vremenskim uslovima.

Kod HVAC vodova gubici usled korone zavise od frekvencije i javljaju se pri vršnim vrednostima napona u obe poluperiode dok su kod HVDC vodova usled konstantnosti napona i gubici usled korone konstantni. Kod HVAC vodova su gubici približno jednaki na sve tri faze dok se kod HVDC vodova usled nižeg početnog gradijenta korone, na negativnom polu javljaju veći gubici nego na pozitivnom.

U ekonomskoj evaluaciji, uglavnom se uzima da je 80% vremena suvo odnosno lepo vreme i 20% vremena loše vreme.

Proračunati gubici usled korone na analiziranom HVDC dalekovodu pri lepom vremenu, odnosno u uslovima kada je provodnik suv su 3.81 kW/km, odnosno 21.73 kW/km pri lošem vremenu, kada je provodnik vlažan. Za analizirani HVAC dalekovod gubici usled korone po lepom vremenu, odnosno u uslovima kada je provodnik suv su 4.18 kW/km, odnosno 409.02 kW/km pri lošem vremenu i kada je provodnik vlažan.

2.1.3.4 Radio interferencija i buka

Buka koja se emituje oko provodnika potiče od varijacija pritiska u vazduhu izazvanih korona pražnjenjima, tačnije strimer-pražnjenjima koja se javljaju pri pozitivnom DC naponu ili tokom pozitivne poluperiode AC napona. Ova buka je rezultat velikog broja nekorelisanih korona pražnjenja, što dovodi do širokopojasnog spektra zvučnih frekvencija.

Specifičnosti po pitanju vremenskih uslova:

- Kod HVAC dalekovoda, buka je najizraženija tokom kiše, jer vodene kapljice u jakom električnom polju dovode do više pozitivnih strimer-pražnjenja tokom svake pozitivne poluperiode.
- Kod HVDC dalekovoda, buka je niža tokom kiše nego pri suvom vremenu, jer nema ponavljanih proboja vazdušnih zazora između kapljica i provodnika, što značajno smanjuje broj impulsnih događaja.

Ova razlika proizilazi iz prirode jednosmernog napona, gde polje ne osciluje, te samim tim ne dolazi do istog tipa interakcije sa vodenim česticama kao kod naizmeničnog napona.

Dok gubici usled korone nastaju usled stvaranja i kretanja jona usled korona pražnjenja na provodnicima, radio interferencija i buka se generišu putem pulsni modova korona pražnjenja. Kratkoročni električni impulsi indukovani u provodnicima koji se šire duž provodnika izazivaju radio interferenciju, dok akustični impulsi generisani ovim modovima korone koji se šire u okolnom vazduhu izazivaju buku.

Karakteristike radio interferencije i buke koje generiše korona na HVDC vodovima značajno se razlikuju od onih na HVAC vodovima. Na HVAC vodovima sve tri faze doprinose ukupnom nivou radio interferencije i buke na dalekovodu, dok kod HVDC vodova pozitivni pol dominantno doprinosi nivou radio interferencije i buke.

I analitičke i empirijske metode mogu se koristiti za izračunavanje nivoa radio interferencije na HVDC vodovima. Međutim, analitičke metode zahtevaju poznavanje funkcije pobude radio interferencije za snop provodnika koji se koristi na dalekovodu pod različitim vremenskim uslovima.

Na osnovu podataka dobijenih sa eksperimentalnih, kao i sa vodova u radu, razvijena je jednostavna empirijska formula za predviđanje prosečnog nivoa radio interferencije za bipolarne HVDC vodove.

Kao i u slučaju radio interferencije, analitički tretman buke sa HVDC vodova zahteva poznavanje količine poznate kao generisana akustična gustina snage, koja se može dobiti samo kroz opsežna merenja na eksperimentalnom dalekovodu koristeći različite snopove provodnika i obavljajući merenja u različitim vremenskim uslovima. Na osnovu merenja na eksperimentalnim, kao i HVDC vodovima u radu, i opštih karakteristika korona-generisane buke, razvijena je empirijska formula za prosečan nivo buke sa HVDC dalekovoda.

Proračuni za analizirane vodove urađeni su na udaljenosti od 15 m od krajnjeg faznog provodnika HVAC dalekovoda i na 15 m od pozitivnog pola HVDC dalekovoda, na visini od 1.8 m iznad tla. Proračunati nivo radio interferencije primenom pomenute empirijske formule na HVDC dalekovodu pri lepom vremenu je 50.82 dB, odnosno 45.82 dB pri lošem vremenu. Za analizirani HVAC dalekovod proračunati nivo radio interferencije pri lepom vremenu je 26.76 dB, odnosno 51.76 dB pri lošem vremenu. Nivo buke na HVDC dalekovodu pri lepom vremenu je 40.41 dB, odnosno 34.41 dB pri lošem vremenu. Za analizirani HVAC dalekovod proračunati nivo buke pri lepom vremenu je 29.72 dB, odnosno 54.71 dB pri lošem vremenu.

2.1.3.5 Električno polje na nivou tla i jonska struja

Indukcioni efekti ispod HVAC dalekovoda definišu se uglavnom preko jačine i frekvencije naizmeničnih električnih polja na površini tla. Međutim, kod HVDC dalekovoda, kako jačina električnog polja tako i jonska struja generisana koronom na nivou tla moraju se uzeti u obzir da bi se pravilno opisali indukcionni efekti.

Jonizovani naelektrisani prostor koji se stvara korona pražnjenjem ispunjava čitav prostor između provodnika i površine tla. Kod jednopolarnih i bipolarnih HVDC dalekovoda, na površini tla postoji isključivo pozitivno ili negativno naelektrisano jonizovano polje. Kombinovano prisustvo jednosmernog električnog polja i jonizovanog naelektrisanog prostora poznato je kao polje prostornog naelektrisanja (*space charge field*).

U odsustvu korone na provodnicima, ne dolazi do stvaranja naelektrisanih čestica, pa se električno polje ispod HVDC voda može izračunati koristeći principe elektrostatike. Prisustvom prostora naelektrisanog jonima koji nastaje usled korone pojačava se električno polje na tačkama koje su udaljene od provodnika, pri čemu se maksimalno pojačanje dešava na nivou tla. Vrednost električnog polja u tački na nivou tla dobija se uključivanjem faktora pojačanja polja koji zavisi od intenziteta korone na provodnicima u snopu i od geometrije dalekovoda.

Merenja električnog polja na nivou tla sprovedena na eksperimentalnom bipolarnom HVDC vodu za različite snopove provodnika, geometrije dalekovoda i napone do ± 1200 kV pokazuju da faktor pojačanja polja varira u rasponu od 1 do 3 u realnim uslovima rada. Za tačno određivanje ovog faktora potrebne su numeričke kalkulacije ili dugoročna merenja na eksperimentalnom vodu.

Za gustinu jonske struje na nivou tla ne postoji jednostavna i validna metoda proračuna. Može se odrediti samo složenim proračunima na osnovu fizičkog modela ili eksperimentalnim studijama.

Kada je reč o projektantskim kriterijumima za električna polja i jonske struje na tlu, nema mnogo pouzdanih naučnih studija. Jedna studija sprovedena je uz izlaganje ljudi električnim poljima i jonskim strujama u kontrolisanom okruženju, koristeći psihofizičke metode. Pokazano je da je ljudska percepcija funkcija i električnog polja E i gustine jonske struje J . Pragovi percepcije su:

- $E_p = 40$ kV/m za $J_p = 0$ nA/m²
- $E_p = 25$ kV/m za $J_p = 100$ nA/m²

Pošto projektovanje dalekovoda bez efekata korone nije ekonomski isplativo, projektni kriterijumi treba da uzmu u obzir njeno neizbežno prisustvo. Trenutne preporuke su da se HVDC dalekovodi projektuju tako da ograniče vrednosti pri lepom vremenu na:

- $E_g = 25$ kV/m
- $J_g = 100$ nA/m²

Ako nema dostupnih podataka o maksimalnoj jonskoj gustini J_m , može se koristiti privremeno ograničenje $E_g = 25$ kV/m ispod dalekovoda.

U kontekstu HVDC vodova, električna i magnetna polja su statična, te ne izazivaju indukcijske efekte karakteristične za HVAC vodove. Zbog toga su dozvoljeni intenziteti polja znatno veći za HVDC sisteme u poređenju sa HVAC sistemima.

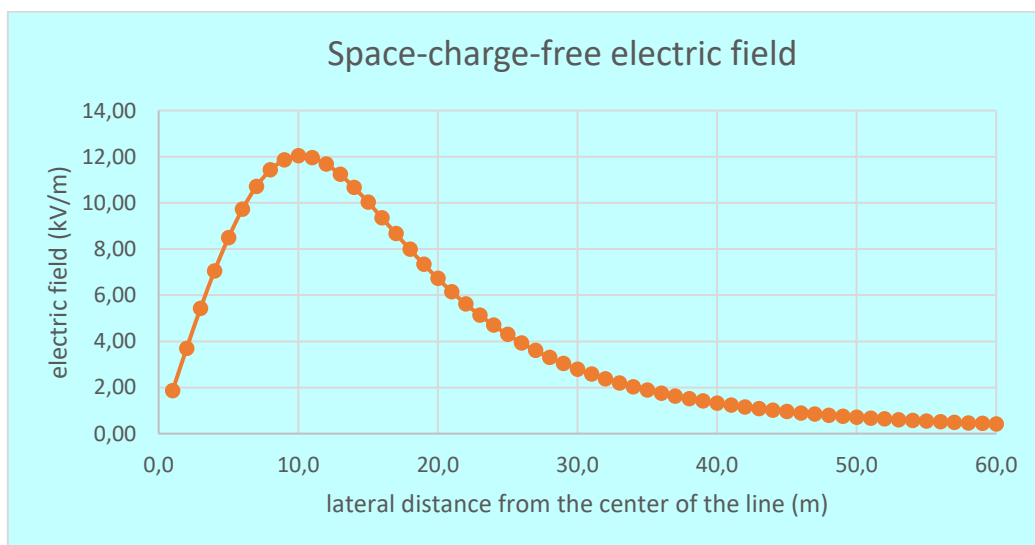
Električna polja na nivou tla značajno se razlikuju kod HVAC i HVDC vodova. Ključna razlika leži u uticaju korone:

- Kod HVAC vodova, električno polje je gotovo nezavisno od korone, jer se joni koji nastaju tokom jedne poluperiode vraćaju na provodnik u narednoj, kada se polaritet promeni.
- Kod HVDC vodova, međutim, korona stvara prostor sa naelektrisanim jonima između provodnika i tla, pri čemu joni umanjuju polje u blizini provodnika, ali istovremeno pojačavaju električno polje na tlu.

Statička električna polja koja proizvode HVDC vodovi ne izazivaju značajne električne struje u telu niti biološke efekte, pa Međunarodna komisija za zaštitu od nejonizujućih zračenja (ICNIRP) nije propisala granične vrednosti za ova polja.

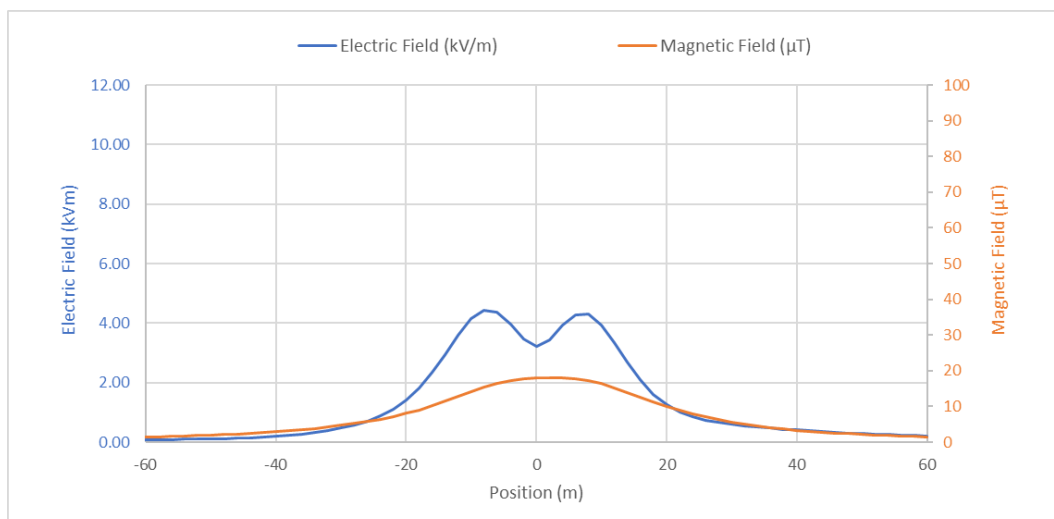
Uprkos ograničenom biološkom uticaju, električno polje pri tlu predstavlja važan parametar u projektovanju HVDC vodova. S druge strane, magnetno polje, čija je jačina slična geomagnetnom polju Zemlje, ima zanemarljiv značaj u projektovanju HVDC vodova.

Na sledećem grafiku je prikazano raspodela električnog polja na nivou tla za analizirani ± 525 kV bipolarni dalekovod, u odsustvu korone na provodnicima.



Slika 8: Raspodela električnog polja na nivou tla za 525 kV HVDC dalekovod bez prisustva korone

Maksimalna vrednost električnog polja na nivou tla uz uvažavanje faktora pojačanja usled prisustva korone na provodnicima je 24.07 kV/m, što je manje od propisanih ograničenja. Na sledećoj slici prikazana je raspodela električnog i magnetnog polja na nivou tla za analizirani 2x400 kV dalekovod.



Slika 9: Raspodela električnog i magnetnog polja na nivou tla za analizirani 2x400 kV dalekovod

2.2 Visokonaponski kablovi u HVDC tehnologiji

Projektovanje i izrada visokonaponskih kablova u HVDC tehnologiji veoma su slični projektovanju i izradi visokonaponskih kablova u HVAC tehnologiji. Specifičan fokus kod HVDC kablova je izbor materijala sa izuzetno visokim stepenom hemijske čistoće. Čak i veoma niske koncentracije hemijskih nečistoća mogu značajno povećati provodljivost, a time i gubitke u izolaciji kabla. Osim toga, nečistoće mogu dovesti do akumulacije prostornog naelektrisanja (*space charge*), što može izazvati električni proboj izolacije. Osim izazova u vezi sa materijalom, veliki tehnički izazov ranije je predstavljala i izrada specijalnih HVDC priključnih komponenti (pribor, spojnice, završnice).

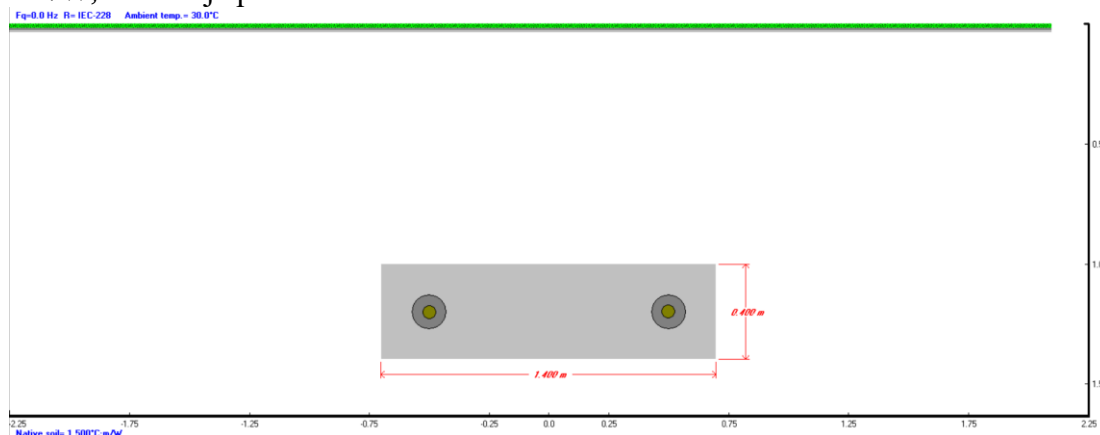
HVDC tehnologija je naročito pogodna za prenos električne energije putem podmorskih kablova, posebno kada su u pitanju veće razdaljine. HVDC kablovi nemaju fizička ograničenja koja su karakteristična za klasične HVAC kablove, kod kojih prisustvo kapacitivnih struja i reaktivne komponente smanjuje ukupni kapacitet prenosa aktivne snage. Iako se reaktivna komponenta može delimično kompenzovati pomoću šant reaktora, njihova primena kod podmorskih kablova je veoma otežana.

Uobičajeno je da su za HVDC prenose putem podzemnih ili podmorskih kablova potrebna najmanje dva kabla, osim u slučajevima kada se na konvertorskim stanicama koristi elektroda u zemlji ili moru kao povratni vod. Ipak, treba imati u vidu da ovakvo rešenje može izazvati ekološke probleme.

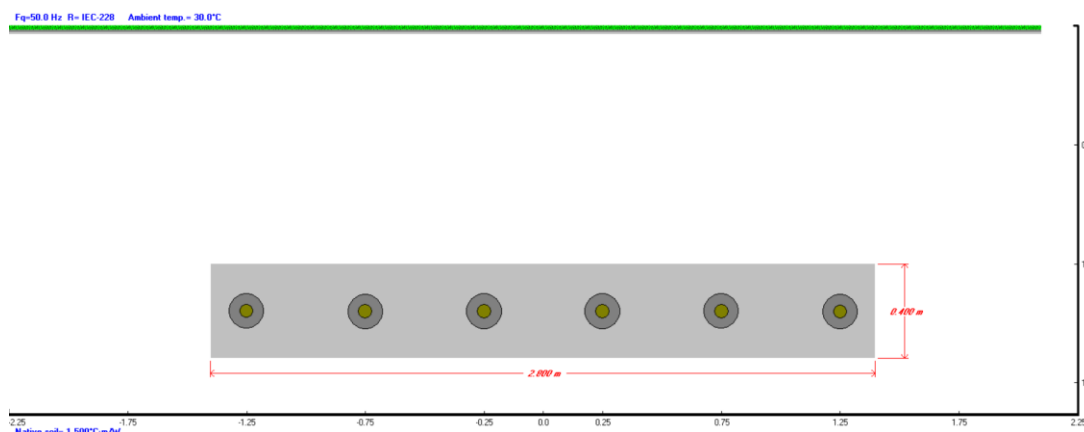
Bipolarna konfiguracija kabla sastoji se od dva pola sa suprotnim polaritetima, pozitivnim i negativnim. U normalnim uslovima rada, struja kruži zatvorenom petljom, bez protoka kroz zemlju, što eliminiše probleme korozije. U slučaju kvara na jednom od polova, drugi može nastaviti sa radom u monopolarnoj konfiguraciji sa povratnim putem kroz zemlju. Količina prenete snage u bipolarnoj konfiguraciji je dvostruko veća u poređenju sa ekvivalentnom monopolarnom.

Za potrebe uporednog prikaza odabranih parametara visokonaponskih kablova odabrani su HVDC ± 525 kV 3000 mm² Cu XLPE kabl i HVAC 400 kV 3000 mm² Cu XLPE kabl.

Za prikaz proračunatih vrednosti korišćena je bipolarna konfiguracija ± 525 kV kabla i dva sistema 400 kV kabla u horizontalnom rasporedu sa primenjenim *cross-bonding* sistemom uzemljenja, direktno položenih u zemlju ambijentalne temperature 30 °C i termičke otpornosti 1.5 Km/W, kao što je prikazano na sledećim slikama.



Slika 10: Konfiguracija 525 kV kabla



Slika 11: Konfiguracija dva sistema 400 kV kabla

2.2.1 Konstrukcija

HVDC kablovi zahtevaju manje materijala za izradu jer je za prenos električne energije dovoljan samo jedan ili dva kabla, dok ekvivalentni HVAC sistem zahteva najmanje tri kabla.

U novije vreme se za HVDC primene koriste dve glavne tehnologije kablova bazirane na umreženom polietilenu (XLPE):

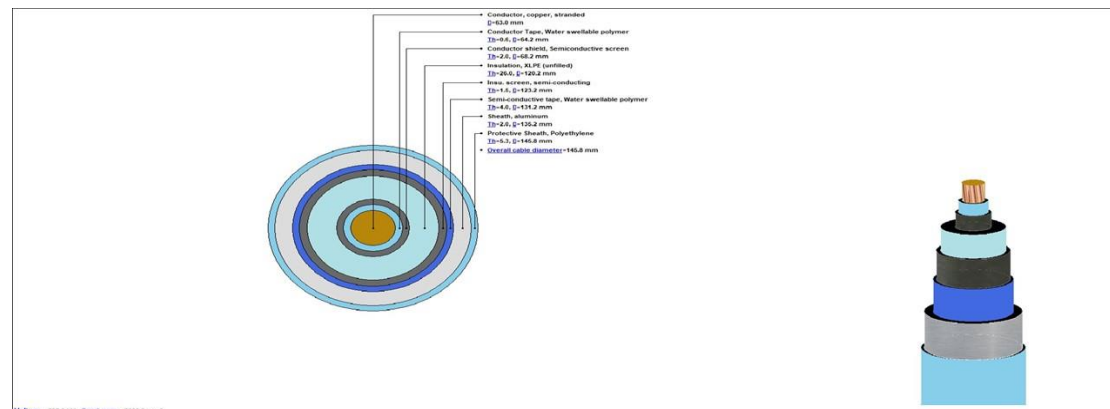
- Kablovi bazirani na izuzetno čistom XLPE materijalu bez aditiva (bare XLPE),
- Kablovi sa XLPE izolacijom dopunjenom nano filerima, koji služe za zarobljavanje prostornog naelektrisanja.

Svi kablovi se sastoje od:

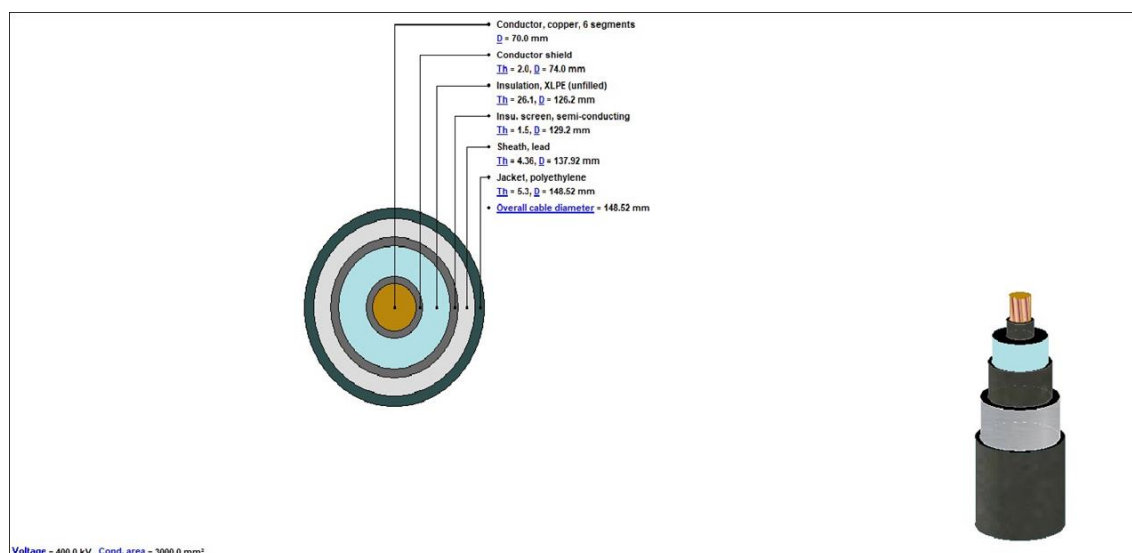
- Provodnika od bakra ili aluminijuma,
- Izolacionog sloja, čija debljina zavisi od radnog napona,
- Metalnog omotača, koji štiti kabl i sprečava prodor vlage,

➤ Spoljašnjeg plastičnog omotača.

Poprečni presezi analiziranih HVDC i HVAC kablova dati su na sledećim slikama.



Slika 12: Presek ±525 kV HVDC kabla



Slika 13: Presek 400 kV HVAC kabla

Za podmorske primene, dodatni zahtev je čelično oklopljavanje odnosno armiranje, koje se sastoji od spiralno namotanih čeličnih žica oko kabla. Ovaj sloj obezbeđuje mehaničku čvrstoću i zaštitu kabla tokom podmorske ugradnje. Iskustvo je pokazalo da se aluminijum mora izbegavati kao komponenta u oklopu kabla, odnosno preporučuje se korišćenje čelične armature, često pocinkovane ili zaštićene drugim slojevima, zbog otpornosti na koroziju, mehaničkih sila i električnih efekata.

Kod HVAC kablova električno polje zavisi od geometrije i dielektrične permitivnosti materijala. Polje je kapacitivno raspodeljeno i konstantno po obliku, ali osciluje u vremenu zbog izmene polariteta. Kod HVDC kablova električno polje zavisi od električne provodnosti izolacije koja je nelinearno zavisna od temperature i jačine polja. Ovo dovodi do neravnomerne raspodele naelektrisanja i vremenske promenljivosti polja, posebno kod dugotrajnog rada. Zato se u HVDC sistemima posebna pažnja posvećuje ograničenju pada temperature kroz izolaciju kako bi se kontrolisalo električno polje. Kod ekvivalentnih HVAC kablova za isti napon je debljina izolacije veća nego kod HVDC kablova.

I HVDC i HVAC kablovi imaju nekoliko poluprovodnih slojeva ali se kod HVDC kablova mora posebno voditi računa o termičkoj stabilnosti tih slojeva, jer neuniformna provodnost može uzrokovati lokalna preopterećenja.

I kod HVAC i kod HVDC kablova se koriste metalni plaševi i armatura s tim da se kod HVAC kablova u njima indukuju gubici usled promenljivog magnetnog polja, pa se na dužim deonicama moraju koristiti specijalne *bonding* tehnologije.

Kod HVDC kablova, optička vlakna mogu biti integrisana u sam kabl, posebno ako se radi o podmorskom kابلu. Njihova primena obuhvata prenos podataka, ali i nadzor parametara energetskog kablova, kao što su distribuirano merenje temperature, merenje mehaničkog naprezanja ili vibracija, kao i detekcija i lociranje kvarova.

2.2.2 Prenosni kapacitet

Zbog kapacitivne struje punjenja u HVAC kablovskim sistemima, prenosni kapacitet sistema opada sa porastom dužine kablova. Ova kapacitivna struja punjenja zavisi od napona – što je napon HVAC sistema veći, to će se prenosni kapacitet brže smanjivati sa povećanjem dužine kablova. Ukoliko je HVAC kabl predugačak, reaktivna snaga koju kabl troši može dostići nivo pri kome zauzima čitav kapacitet prenosa provodnika, te se više ne može preneti korisna aktivna snaga.

HVDC kablovi zauzimaju manji koridor u prostoru u poređenju sa HVAC kablovima sličnih prenosnih moći, kao što je prikazano na Slikama 10 i 11.

Visoki naponi omogućavaju efikasan prenos velikih količina električne energije na velike udaljenosti. Što je napon viši, to su disipativni gubici manji. Na ove gubitke značajno utiču tip provodnika, dužina i poprečni presek voda, kao i tip struje, naizmenična ili jednosmerna. DC struja protiče kroz čitav poprečni presek provodnika, dok AC teži ka površini, što uzrokuje *skin* efekat. Ovaj efekat smanjuje efektivni poprečni presek, povećava električni otpor i samim tim gubitke snage. Električna otpornost provodnika analiziranog HVDC kablova pri radnoj temperaturi je $0.00702 \Omega/\text{km}$ dok je električna otpornost provodnika analiziranog HVAC kablova pri radnoj temperaturi $0.01049 \Omega/\text{km}$.

Pošto napon i struja kod HVDC kablova ne variraju u vremenu, nema ni dielektričnih gubitaka niti indukovanih gubitaka u metalnom plaštu i armaturi. Međutim, prilikom pretvaranja naizmenične u jednosmernu struju, u jednosmernoj struji mogu se pojaviti harmonijske komponente. Ovi harmonici izazivaju dodatne gubitke u metalnom plaštu, kao i izraženije *skin* i *proximity* efekte, koji povećavaju efektivni otpor provodnika. Kod savremenih pretvarača, harmonijske komponente imaju vrlo mali amplitudski nivo u odnosu na prenosnu struju, dok kod starijih generacija pretvarača one mogu imati značajan uticaj na dimenzionisanje kablova. Ako su harmonijske komponente poznate, uvek je preporučljivo uključiti njihov efekat u proračun.

Za proračun strujne nosivosti HVDC kablova, uzimaju se u obzir dva ograničavajuća faktora. Prvi je maksimalno dozvoljena temperatura provodnika, koja je povezana sa maksimalnom radnom temperaturom izolacije, slično kao i kod HVAC kablova. U slučaju analiziranih kablova, za maksimalnu dozvoljenu temperaturu provodnika kod HVDC kablova uzeta je vrednost od 70°C , dok je za HVAC kabl ta vrednost 90°C . Drugi faktor je maksimalno dozvoljena jačina električnog polja na granici izolacije i ekrana kada kabl prenosi struju.

U HVDC kablovima, električno polje određeno je karakteristikama koje zavise od specifične električne otpornosti izolacionog materijala, za razliku od HVAC kablova gde je električno polje određeno kapacitivnim svojstvima, odnosno zavisi od dielektrične permitivnosti. Električno polje na granici izolacije, odnosno spoljašnjem radijusu izolacije raste sa povećanjem opterećenja. Ovo se može objasniti činjenicom da raspodelu električnog polja uglavnom određuje provodnost izolacije za zadati napon. Pošto je provodnost zavisna od temperature, raspodela električnog polja takođe postaje temperaturno zavisna te se električno polje na granici izolacije može izraziti kao funkcija temperaturne razlike kroz izolaciju. Kako bi se osiguralo da električna polja u izolaciji ostanu unutar dozvoljenih granica, temperaturna razlika kroz izolaciju mora biti ograničena. Ovo ograničenje može biti strože od samog ograničenja maksimalne radne temperature provodnika, a tipične vrednosti ograničenja temperaturne razlike kreću se između 10 i 15 K. Treba napomenuti da se može desiti da se temperaturni limit kroz izolaciju dostigne i pre nego što se dostigne maksimalna temperatura provodnika. Dato ograničenje temperaturne razlike potvrđuje se tokom tipskog ispitivanja i važi samo za dati napon.

Proračunato strujno opterećenje analiziranog HVDC kabla uvažavajući ograničavajuće faktore je 1893 A, što dovodi do prenosne moći ± 525 kV bipolarnog kablovskog sistema od 1987.65 MW. Proračunato strujno opterećenje analiziranog HVAC kabla je 1317 A, što dovodi do prenosne moći dvostrukog 400 kV kablovskog sistema od 1822.73 MW. U sledećoj tabeli je dat uporedni prikaz gubitaka na analiziranim HVAC i HVDC kablovima.

Proračunati gubici po kablu		HVAC	HVDC
Gubici na provodniku	W/m	18.19	25.14
Dielektrični gubici	W/m	4.36	0.00
Gubici na metalnom plaštu	W/m	0.92	0.00
Ukupni gubici	W/m	23.47	25.14

Ukupni gubici na dvostrukom HVAC kablovskom sistemu su 140.82 W/m, dok su gubici na bipolarnom HVDC kablovskom sistemu 50.28 W/m.

2.2.3 Elektromagnetno polje

Razlike u raspodeli električnog polja unutar HVAC i HVDC kablova proističu iz konstantnog napona koji se primenjuje kod HVDC sistema i nelinearne električne provodljivosti izolacionog materijala. Dok HVAC kablovi stvaraju vremenski promenljiva eliptična elektromagnetna polja, HVDC sistemi generišu statičko elektromagnetno polje. Zbog toga se biološki efekti statičkih DC i eliptičnih AC polja razlikuju, i ne treba upoređivati vrednosti magnetnog polja za HVAC i HVDC sisteme. Električno polje u HVAC kablovima određeno je geometrijom i permitivnošću, a suprotno tome, električno polje u HVDC kablovima definiše se nelinearnom električnom provodljivošću, koja prvenstveno zavisi od temperature i električnog naponskog naprezanja.

Zbog niske provodljivosti izolacije, statičko električno polje uspostavlja se nakon nekog vremena. Izolacioni materijali kod HVDC kablova se najčešće modifikuju kako bi se suzbila akumulacija naelektrisanja i sprečila značajna inverzija električnog polja.

Pored toga, visoke vrednosti električnog polja i temperature dovode do procesa ubrizgavanja naelektrisanja sa obe elektrode. Ubrizgana homo-naelektrisanja doprinose smanjenju intenziteta električnog polja, posebno u blizini metalnog omotača.

Za razliku od HVAC pulsni magnetni polja, koja izazivaju indukzione fenomene i kružne struje, HVDC statička polja ne izazivaju takve efekte, osim u krajnje nepraktičnim slučajevima, na primer ako se izvor približava velikom brzinom. Glavni zaključak višegodišnjih istraživanja je da statičko magnetno polje HVDC kablovskog sistema, izračunato ili izmereno na visini od jednog metra iznad površine tla, ima isti red veličine kao prirodno magnetno polje Zemlje, odnosno nekoliko desetina mikrotlesa, što je oko 1000 puta manje od preporučene granice izloženosti za opštu populaciju. Čak i na samoj površini HVDC kabla, izmereno polje ne prelazi 40 mT.

Biološki odgovor na statička HVDC i eliptična HVAC polja se značajno razlikuje, pa se njihove vrednosti magnetnog polja ne mogu direktno upoređivati.

Dok je za HVAC kablovske sisteme dostupno mnogo tehnika za smanjenje elektromagnetnih polja koje se zasnivaju na pasivnim petljama i pločama visoke provodljivosti koje stvaraju protivpolja usled indukovanih struja, kod HVDC sistema to nije moguće jer statičko polje ne izaziva indukzione efekte. Jedino efikasno rešenje za HVDC je korišćenje feromagnetnih struktura ili cevi.

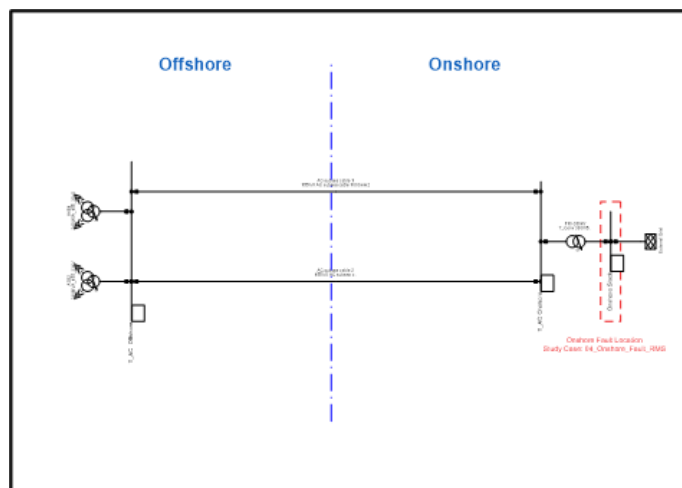
3 UPOREDNI PRIKAZ UTICAJA POREMEĆAJA U HVDC I HVAC MREŽAMA NA STABILNOST SISTEMA

HVDC sistemi, a posebno moderni VSC-HVDC sistemi, omogućavaju naprednu i preciznu kontrolu prenosa električne energije. HVDC sistemi mogu zasebno upravljati aktivnom i reaktivnom komponentom snage, što je nemoguće u klasičnim HVAC sistemima, čime se omogućava da se napon i frekvencija u mreži precizno podešavaju čak i tokom poremećaja. Elektronski konvertori reaguju mnogo brže od elektromehaničkih sistema kod HVAC mreža, što znači da se u HVDC sistemu može trenutno prilagoditi tok snage i stabilizovati sistem kod iznenadnog poremećaja.

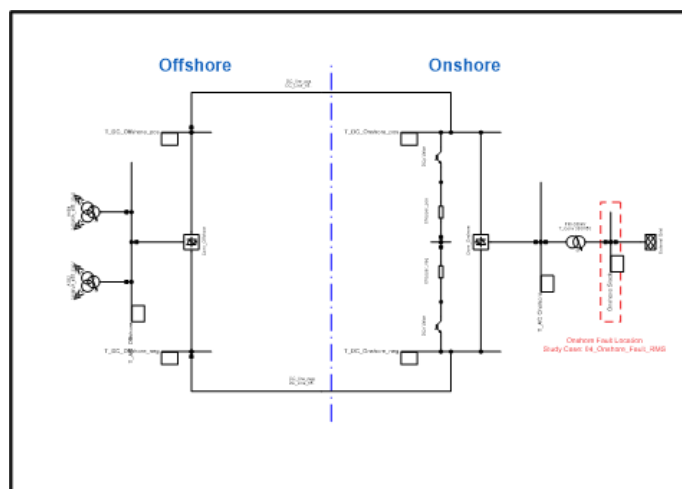
HVDC sistemi omogućavaju povezivanje različitih HVAC sistema koji ne moraju biti sinhronizovani. Time kvar u jednoj HVAC mreži ostaje lokalizovan i ne destabilizuje drugu jer HVDC veza izoluje oscilacije i poremećaje. HVDC prenosni sistem deluje kao tampon zona, koja sprečava širenje oscilacija i poremećaja i omogućava fleksibilnije reagovanje operatera. HVDC konvertori mogu aktivno učestvovati u stabilizaciji, odnosno mogu ubrizgavati ili povlačiti reaktivnu snagu kako bi stabilizovali napon, ili ograničiti tok aktivne snage kako bi se rasteretila mreža.

U radu je analiziran slučaj prolaska kroz kvar jedne *offshore* vetroelektrane naznačene snage 400 MW. Kao jedan način priključenja vetroelektrane na mrežu, analizirano je priključenje korišćenjem podvodnih HVAC kablovskih sistema, dok je za drugi način usvojeno korišćenje HVDC kablovskih sistema sa naponski kontrolisanim konvertorima. Što se tiče drugog načina priključenja, jedna konvertorska stanica je instalirana na kopnu i kontroliše priključenje elektrane na mrežu, odnosno injektiranje aktivne i reaktivne snage. U toku normalnog rada sistema, aktivna snaga kontrolera HVDC konvertora je prioritet, dok prilikom poremećaja u mreži kao što su kvarovi, reaktivna snaga ima prednost, kao vid podrške sistemu.

Druga konvertorska stanica, koja je u funkciji priključenja same *offshore* vetroelektrane, kontroliše napon i frekvenciju u okviru elektrane, odnosno formira jaku i stabilnu mrežu za evakuaciju proizvedene energije iz vetroelektrane. Ovaj konvertor ne kontroliše aktivnu i reaktivnu snagu koja prolazi kroz njega, već se ponaša kao balansni čvor i svu proizvedenu energiju sprovodi ka mrežnom HVDC konvertoru. Na slikama 14 i 15 prikazani su načini modelovanja priključenja vetroelektrane preko HVAC i HVDC kablovskih sistema, respektivno.



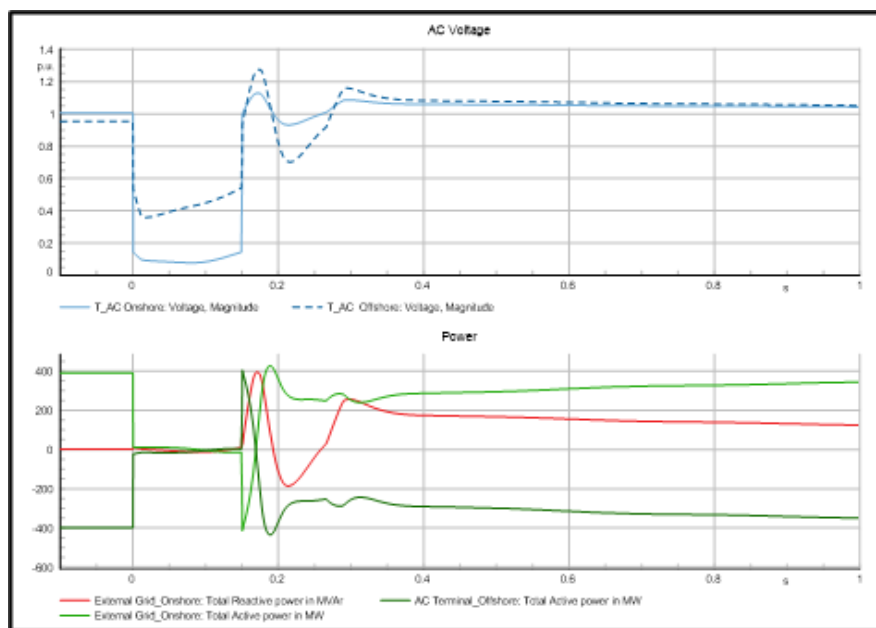
Slika 14: Priklučenja vetroelektrane preko HVAC kablovskog sistema



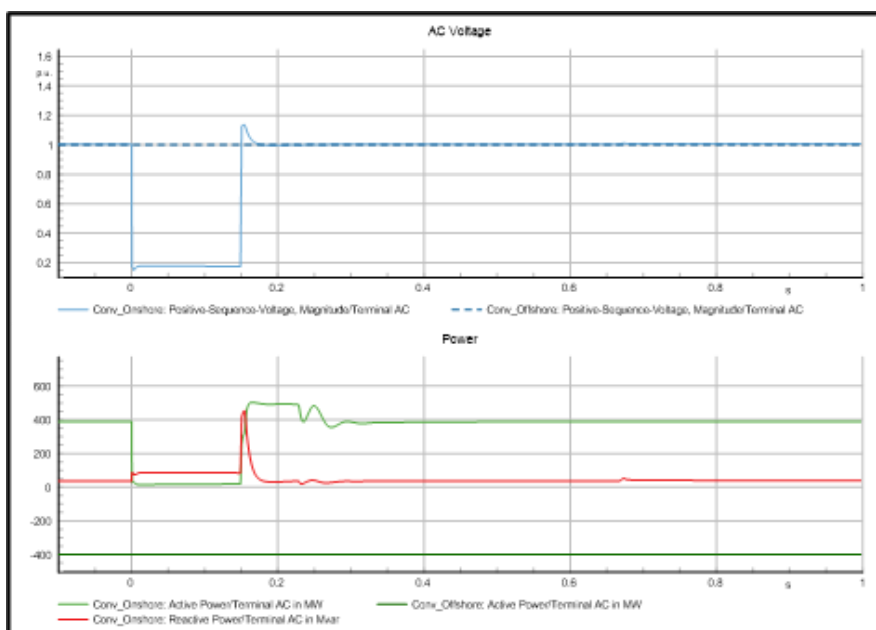
Slika 15: Priklučenja vetroelektrane preko HVDC sistema

Što se tiče simulacione postavke, analiziran je kvar u tački priključenja elektrane na mrežu, odnosno na visokonaponskoj strani mrežnog transformatora, u trajanju od 150 ms i zaostalim naponom u tački priključenja približno 0.15 r.j. Rezultati analize dati su na graficima u nastavku.

Na slici 16, kada je elektrana priključena na mrežu preko HVAC kablovskog sistema, primećuju se velike oscilacije napona u tačkama priključenja, odnosno *onshore* i *offshore* terminalima i snaga elektrane, kako tokom tako i nakon kvara. Naponi i odziv elektrane se stabilizuju nakon određenog perioda, dok odziv elektrane pre kvara nije dostignut za vreme trajanja simulacije.



Slika 16: Rezultati simulacije kvara za slučaj priključenja vetroelektrane preko HVAC kablovskog sistema



Slika 17: Rezultati simulacije kvara za slučaj priključenja vetroelektrane preko HVDC kablovskog sistema

Na slici 17, kada je elektrana priključena preko HVDC sistema na mrežu, primećuje se da na odziv elektrane ne utiče kvar sa strane mreže. Ovo je moguće jer je elektrana električno odvojena od ostatka sistema preko HVDC kablova i konvertora. Proizvedena aktivna snaga elektrane u toku kvara se ne može evakuisati u mrežu, već se troši na gubitke otpornika koji su preko čopera priključeni u DC kolo u toku trajanja kvara. Mrežni konvertor prepoznaje kvar u tački priključenja i prelazi u režim gde reaktivna snaga ima prioritet, i na taj način daje reaktivnu podršku mreži. Nakon otklanjanja kvara, tranzijent vrlo kratko traje i sistem ulazi u stacionarno stanje koje je postojalo pre kvara.

4 ZAKLJUČAK

Uporedna analiza HVAC i HVDC prenosnih sistema jasno pokazuje da, iako oba imaju svoje tehničke prednosti i ograničenja, HVDC tehnologija postaje sve značajniji faktor u razvoju savremenih elektroenergetskih mreža. HVAC sistemi, kao tradicionalni stub prenosa električne energije, i dalje imaju ključnu ulogu u lokalnom i regionalnom prenosu energije, ali pokazuju ograničenja kada je u pitanju kontrola stabilnosti tokom kvarova, naročito na velikim udaljenostima i pri povezivanju slabih mrežnih čvorova. S druge strane, HVDC sistemi nude niz prednosti u pogledu stabilnosti sistema, omogućavaju asinhrono povezivanje različitih AC mreža, preciznu kontrolu aktivne i reaktivne snage, brži odziv sistema na poremećaje i efikasniju lokalizaciju kvarova.

Sa infrastrukturnog aspekta, HVDC dalekovodi omogućavaju prenos velikih količina energije na veoma dugim relacijama uz niže gubitke u poređenju sa HVAC sistemima. U urbanim sredinama i podmorskim aplikacijama, HVDC kablovi su posebno pogodni jer zauzimaju manje prostora, imaju manje uticaja na okolinu i omogućavaju efikasan prenos bez potrebe za reaktivnom kompenzacijom.

U skladu sa globalnim trendovima dekarbonizacije i digitalizacije energetskog sektora, očekuje se da buduća elektroenergetska mreža bude hibridnog karaktera, sa dominantnim HVAC sistemima u lokalnoj distribuciji i sve većim udelom HVDC sistema za međusobno povezivanje i balansiranje složenih i geografski disperzovanih izvora i potrošača energije. Iako je početna investicija u HVDC tehnologiju viša, posebno zbog konvertorskih stanica, ukupni troškovi eksploatacije, manji gubici i povećana pouzdanost čine je isplativijom za dugoročne i strateške projekte.

5 LITERATURA

- [1] Electric Power Research Institute, Transmission line reference book HVDC to ± 600 kV
- [2] Electric Power Research Institute, AC Transmission Line Reference Book - 200 kV and above
- [3] CIGRE technical brochure 388, Impacts of HVDC lines on the economics of HVDC projects
- [4] CIGRE technical brochure 583, Guide to the conversion of existing AC lines to DC operation
- [5] CIGRE technical brochure 533, HVDC Grid Feasibility Study
- [6] <https://www.hvdcworld.com/>