

**PREGLED HVDC PRENOSA****A REVIEW OF HVDC TRANSMISSION**Miljan Ubiparip, Darko Marčetić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – Visokonaponski prenos jednosmjernom strujom (High Voltage Direct Current - HVDC) je bio alternativna metoda u prenosu električne snage sa jedne lokacije na drugu. Razvojem energetske elektronike otvaraju se nove primjene HVDC prenosa. U ovom radu su razmatrane bitne osobine HVDC prenosa, kao i primjena energetske elektronike u sistemima baziranim na ovoj tehnologiji. Naglašene su prednosti, kao i nedostaci u odnosu na naizmjenične sisteme. Na kraju će biti dat osvrt na DC prenosne mreže.

**Ključne reči:** HVDC prenos, LCC konvertor, VSC konvertor, MMC konvertor, DC prenosna mreža

**Abstract** – High Voltage Direct Current (HVDC) transmission has been an alternative method of transmitting electric power from one location to another. The development of power electronics creates various applications of HVDC transmission and application of power electronics in systems based on this technology are discussed in this paper. Advantages, as well as disadvantages comparing to AC systems are emphasized. DC transmission grids will be reviewed at the end of this paper.

**Keywords:** HVDC transmission, LCC converter, VSC converter, MMC converter, DC transmission grid

**1. UVOD**

Dugo vremena se elektroprivreda doživljavala kao stabilan i potpuno sazreo sektor, koji dobro posluje bez puno inovacija. Posljednjih decenija situacija se drastično promenila.

Potreba za energijom je sve veća i jedno od rješenja je prenos energije iz izvora električne energije koji su geografski udaljeni u odnosu na mjesta potrošnje. Ali, sa uvećanjem dužine prenosa, problemi u AC prenosu energije se višestruko usložnjavaju. Nadalje, ulaskom obnovljivih izvora nacionalni EES postaju sve nestabilniji, i javlja se potreba da se ti međusobno veoma udaljeni sistemi povremeno pomažu razmjenom energije.

Konačno, da bi se u datom trenutku vremena maksimalno iskoristila energija svih raspoloživih obnovljivih izvora, optimalno rešenje bi bila globalna elektroenergetska mreža koja bi omogućila povezivanje i razmenu energije između geografski udaljenih distribuiranih izvora i potrošača.

**NAPOMENA:**

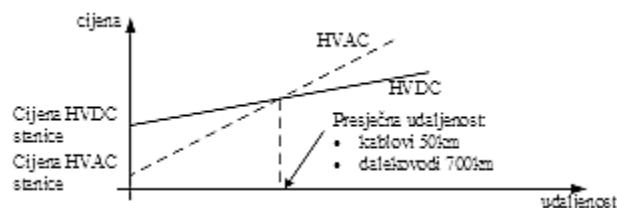
Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Darko Marčetić, red. prof.

Iz gore navedenih razloga razvijen je visokonaponski prenos jednosmjernom strujom (High Voltage Direct Current - HVDC) i dokazano je da je on najbolje rješenje za mnoga područja primjene, a broj instalacija po godini neprestano raste od početka dvadeset prvog veka. Unapređenje uređaja energetske elektronike (najviše IGBT tranzistora) u posljednje dve decenije je izmjenio odnos prema HVDC prenosu.

**2. POREĐENJE AC I DC PRENOSA**

Usvajajući da su karakteristike izolatora za AC i DC prenos slične, DC vod može prenijeti istu snagu sa dva provodnika kao što to može AC vod sa tri provodnika iste veličine. Zbog navedenog razloga, DC vodovi zauzimaju mnogo manje zemljišta, jednostavnije i jeftinije stubove, kao i manje troškove provodnika i izolatora.

Sa aspekta gubitaka snage, zbog korišćenja samo dva provodnika, DC prenos ima za dve trećine manje gubitke nego tradicionalni AC prenos. Pored ovoga, pri DC prenosu, nema se površinskog efekta i dielektrični gubici su mnogo manji, pa imamo smanjenje gubitaka u odnosu na AC prenos. Ostali značajni troškovi prenosa jesu troškovi prekidačkih (ispravljačkih i invertorskih) stanica u slučaju DC prenosa. Usljed prisustva elektro-energetskih pretvarača i filtera, cena izrade HVDC stanice je značajno veća nego cena izrade tradicionalne HVAC stanice. Na slici 1. prikazano je poređenje cijene HVDC i HVAC prenosa u zavisnosti od dužine dalekovoda/kablova.



Slika 1. Poređenje cijene HVDC i HVAC za nadzemne vodove i za kablove

Zahvaljujući svojoj brznoj kontroli, prednosti DC prenosa u odnosu na AC prenos su potpuna kontrola nad prenešenom snagom, poboljšane prelazna i dinamička stabilnost u pridruženim AC mrežama, brza kontrola ograničavanja struje kratkog spoja u DC linijama.

**3. TIPOVI HVDC SISTEMA**

U zavisnosti od lokacije, tipa, svrhe upotrebe, kao i izbora kabla, postoji par različitih konfiguracija HVDC prenosa:

- Monopolarni,
- Bilolarni,
- Back-to-back,
- Multiterminalni i
- Tripolarni HVDC prenos.

Monopolarna konfiguracija HVDC prenosa se sastoji od dvije konvertorske stanice i DC linije koja ih povezuje (jedan provodnik). Bipolarna konfiguracija HVDC prenosa predstavlja paralelnu vezu dva monopolarna sistema. U slučaju kvara na jednoj od dvije linije, druga nastavlja da radi po principu monopolarne konfiguracije, koristeći zemlju kao povratni vod.

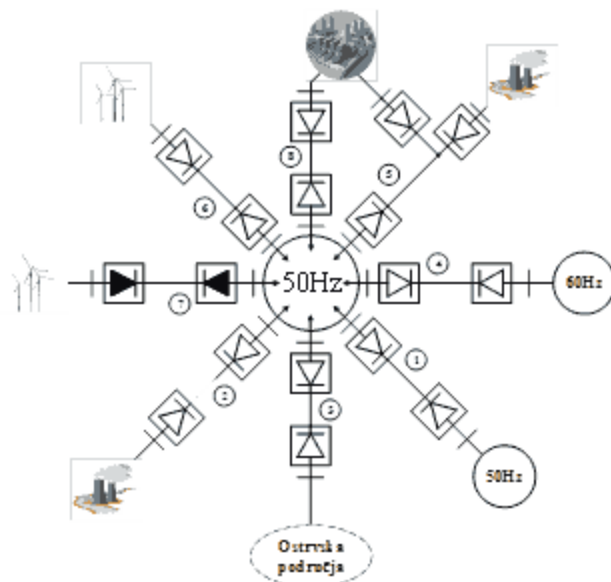
Promjena smjera toka snage je moguća, jer u slučaju potrebe, jedna pretvaračka stanica prelazi iz rada ispravljačke u rad invertorske stanice, a druga obrnuto. Back-to-Back HVDC prenosni sistem se sastoji od dvije pretvaračke stanice postavljene na istoj lokaciji. Kod ove konfiguracije, ne postoji DC linija prenosa. Ova konfiguracija koristi se za povezivanje dvije AC mreže. Multi-terminalna konfiguracija HVDC prenosnog sistema se sastoji od DC prenosne linije i više konvertora, koji mogu biti povezani redno ili paralelno.

Na ovaj način, pruža se dodatna pouzdanost sistema, jer se za cilj ovakve konfiguracije ima povezivanje više pojedinačnih AC sistema u jedan zajednički sistem. Tripolarna konfiguracija HVDC prenosnog sistema je najnovija konfiguracija HVDC prenosa. Koristi se u sistemima baziranim na MMC konvertorima.

#### 4. PRIMJENA HVDC PRENOSA

Na slici 2. prikazane su razne primjene HVDC prenosnog sistema:

1. Prenos snage dalekovodima na veliku daljinu. Pri ovoj primjeni, HVDC sistem postaje isplativ za udaljenosti preko 700km,
2. Prenos snage podvodnim kablovima na veliku daljinu. Usljed problema velike kapacitivnosti i problema sa kompenzacijom reaktivne snage, kod ovakve primjene HVDC prenos postaje isplativ već nakon 50km udaljenosti,
3. Stabilizacija protoka električne energije u integrisanom elektroenergetskom sistemu. Strateški postavljen HVDC sistem može prevazići problem prigušenja elektromagnetskih oscilacija i stabilnosti mreže. Zbog brze kontrole, HVDC sistem pruža prijeko potrebna prigušivanja i pravovremene mogućnosti preopterećenja,
4. Povezivanje dvije AC mreže različitih frekvencija, kao i dvije nesinhronizovane AC mreže. Bez obzira na razliku u frekvenciji ili faznoj razlici, dvije AC mreže mogu biti povezane koristeći HVDC sistem (osim u slučaju kada je fazna razlika velika, tada nije moguća direktna veza),
5. Kada se snaga treba prenositi sa udaljene lokacije kroz različite države ili različita područja unutar jedne države, moguće je koristiti multiterminalni HVDC prenos,
6. U slučajevima kada se koriste obnovljivi izvori električne energije koji su obično na udaljenim lokacijama od potrošača,
7. Sve veći značaj u HVDC sistemima zauzimaju sistemi sa naponskim pretvaračima,
8. Budući da se reaktivna snaga ne prenosi preko DC linije, dva AC sistema se mogu povezati preko HVDC linije bez povećanja snage kratkog spoja.



Slika 2. Oblasti primjene HVDC prenosa

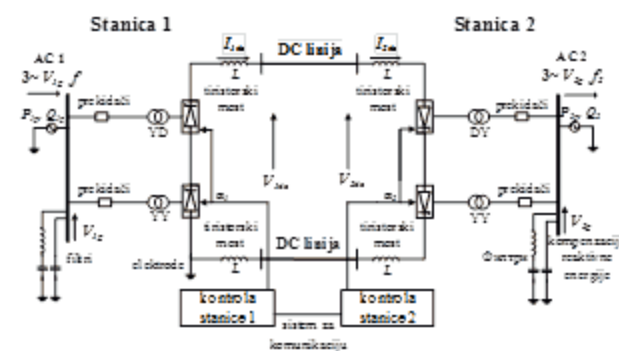
#### 5. ENERGETSKA ELEKTRONIKA U HVDC PRENOSU

Da bi konverzija električne energije iz naizmjeničnih sistema u jednosmjerne bila moguća, neophodno je postojanje energetskih pretvarača električne energije. Dvije osnovne konfiguracije HVDC sistema potrebne da bi ovaj proces konverzije bio ostvaren su:

- HVDC sa strujnim konvertorima (Line-Commutated Converter - LCC) i
- HVDC sa naponskim konvertorima (Voltage Source Converter - VSC).

##### 5.1 HVDC sa strujnim konvertorima

HVDC se sastoji iz sistema za prenos i konvertora. Tipičan dijagram linijski komutovanog HVDC je dat na slici 3.



Slika 3. Blok dijagram linijski komutovanog HVDC sistema

Osnovni dijelovi ovog sistema su:

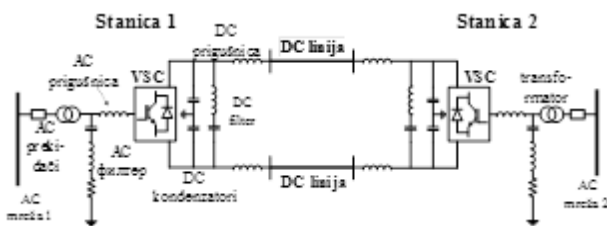
- Pretvarači su jedan ili više 6-pulsnih tirostorskih mostova povezanih serijski u 12 ili 24 pulsnoj konfiguraciji. Svaki most u sebi poseduje na stotine tiristora,
- Specijalni transformatori. Osnovna osobina im je da rade sa strujama i naponima bogatog harmonijskog sastava i da mogu da izdrže naponske i strujne udare.
- Prigušnice sa DC strane reda veličine 0.5H. Njihova uloga je da uvećaju dinamičku stabilnost, smanje struju greške i priguše komutacione harmonike,

- Kompenzatori reaktivne snage. HVDC konvertori zahtevaju i do 60% reaktivne snage u odnosu na nominalnu snagu. Iz tog razloga se postaju filterske banke koje daju veliku količinu te snage i time se ne opterećuje AC sistem. Banke za kompenzaciju reaktivne snage su varijabilne, tj menjaju se u zavisnosti od količine prenesene energije koja definiše količinu potrebne reaktivne snage.
- Filtri. Tipičan 12-tiristorski pretvarač utiskuje jedanaesti, trinaesti, dvadeset treći i dvadeset peti harmonik u AC mrežu pa se sa AC strane postavljaju filtri na tim frekvencijama. Ponekad se filtri stavljaju i na DC stranu.

Kontrola tiristorskog ispravljača ima dva osnovna cilja, da utisne željenu DC snagu u HVDC liniju i da obezbedi sinhronizaciju sa mrežom. Kontroler se sastoji iz unutrašnje strujne regulacione konture koja upravljanjem uglom uključivanja tiristora reguliše struju na željenom nivou i spoljašnje regulacione kontrole snage koja upravljanjem snagom reguliše snagu utisnutu u HVDC na zadanom nivou. Sinhronizacija sa mrežom se zasniva na klasičnoj PLL strukturi koja prati ugao mreže i obezbeđuje da je ugao uključivanja sinhronizovan sa prolascima mrežnog napona kroz nulu. Kontrola snage koja se utisne u HVDC prenosnu liniju je primarna funkcija HVDC ispravljača.

## 5.2 HVDC sa naponskim konvertorima

Naponski konvertori (Voltage Source Converter – VSC) koriste IGBT prekidače koji su samo komutujuć, tj. uključuju se i isključuju u zavisnosti od kontrolnog signala na kontrolnoj elektrodi (gate), nezavisno od napona mreže. Ovim je omogućeno PWM upravljanje koje generiše više prekidačke frekvencije (1kHz) i samim tim su oblici izlaznih DC i AC napona mnogo približniji željenim, sa manjim varijacijama napona i struje. Ove varijacije su ujedno i na višim učestanostima, tako da su potrebni manji i jeftiniji filtri na izlazima VSC pretvarača. VSC se mogu u potpunosti sinhronizovati sa mrežom, i time nezavisno upravljati aktivnom i reaktivnom snagom. VSC neosporno obezbeđuju kvalitetniji HVDC prenos. Jedini problem je cijena, koja ograničava snagu na kojoj ovaj tip prenosa može da se primeni.



Slika 4. Blok šema HVDC sa dva naponska konvertora sa IGBT prekidačima

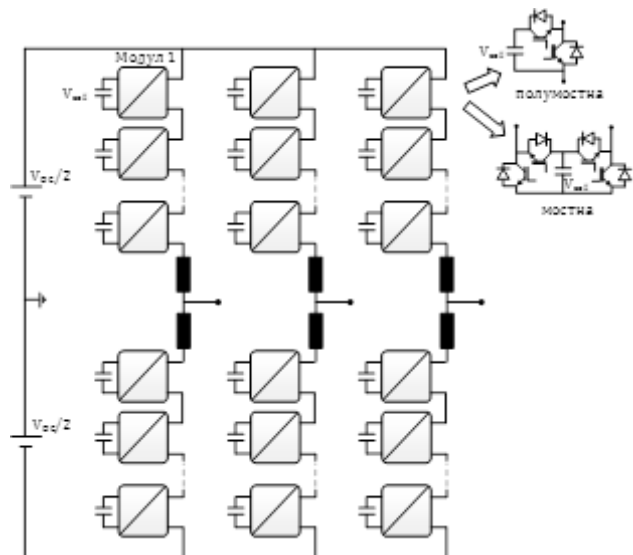
Osnovni dijelovi VSC HVDC pretvaračke stanice su:

- AC prekidači. AC prekidači se koriste za uključivanje/isključivanje sistema tokom normalnih i havarijskih stanja. Sa aspekta dizajna, ne postoje posebni zahtjevi u odnosu na tradicionalne sisteme napajanja,
- Transformator. Koristi se trofazni transformator sa kontrolom regulacione preklopke (osim u slučaju MMC HVDC sistema, kada se mogu koristiti standardni transformatori),
- AC filtri. Ovi filtri imaju niže nazivne vrijednosti od onih korišćenih u LCC HVDC konfiguraciji i nije

potrebno da obezbede kompenzaciju reaktivne snage. Niskopropusni LC filter se obično koristi za suzbijanje viših harmonika i sprječavanje interakcije sa osnovnim harmonicima,

- DC kondenzatori. Ovo uređaji služe za skladištenje energije u VSC konfiguraciji kao i filtraciju harmonika.
- DC filtri. Koriste se umjesto povećavanja DC kondenzatora, za eliminaciju određenih harmonika.
- Pretvarač koji se sastoji od niza modula (ćelija) koji će biti detaljnije objašnjeni u nastavku.

## 5.3 Modularni naponski konvertor – MMC

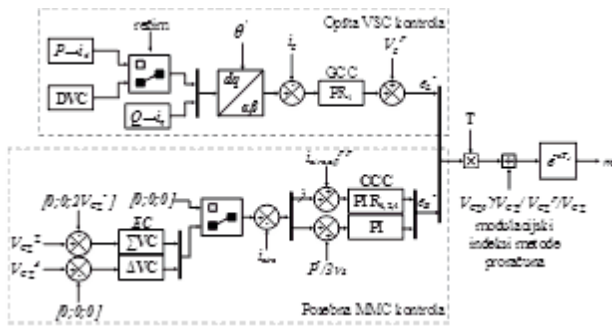


Slika 5. Trofazni MMC

Osnovna ideja modularnih konvertora sa više nivoa (Multilevel Modular Converter – MMC) je da se jedan isti prekidački modul koristi u svim topologijama. MMC su veoma atraktivni jer kada se napravi jedan dobar modul onda se topologije, broj nivoa, broj grana, razlikuju samo po načinu i broju povezanih modula. MMC su danas dominantna tehnologija u HVDC i u drugim visokonaponskim primjenama energetske elektronike.

Osnovna gradivna jedinica MMC konvertora je modul, ili ćelija. Postoje dvije vrste modula, polumostni sa dva prekidača, i mostni sa četiri prekidača.

Upravljačka struktura trofaznih VSC konvertorom sa MMC topologijom je data na slici 6. (invertorski režim rada). Konvertor se sinhronizuje sa mrežom na koju je povezan preko klasične PLL strukture. U tom slučaju koordinatni sistem sinhrono rotira sa naponskim vektorom mreže i aktivnu snagu je moguće regulisati upravljanjem d komponentom mrežne struje. Reaktivna snaga se reguliše nezavisno, upravljanjem q komponentom mrežne struje. Ovaj dio upravljačke strukture na slici je obilježen kao „Opšta VSC kontrola“. Razlika u upravljanju MMC VSC se javlja u dijelu koji se bavi kontrolom balansa plivajućih kondenzatora (slika 6. dio „Posebna MMC kontrola“).



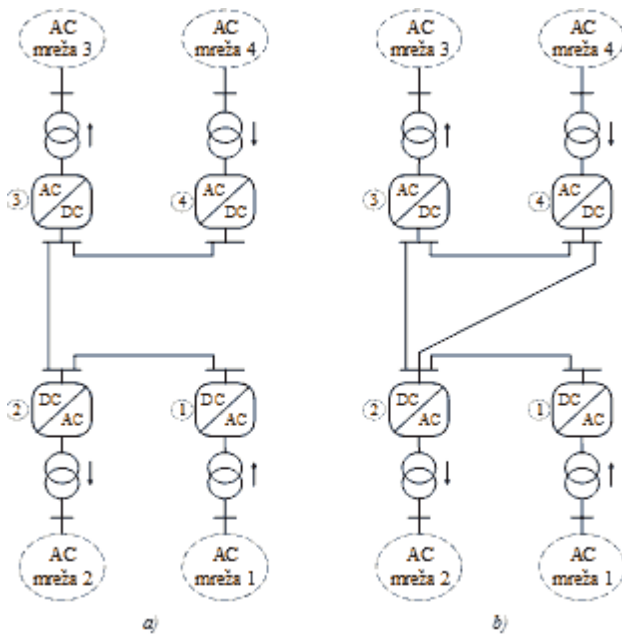
Slika 6. Pojednostavljeno upravljanje MMC konvertorom u invertorskom režimu rada

## 6. DC PRENOSNE MREŽE

Osnovna funkcija DC mreže jeste povezivanje HVDC linkova i omogućavanje razmjene snage između svih DC terminala. Ovo donosi mnogobrojne prednosti kao što su: bolje iskorišćenje prostora (zemljišta), veću pouzdanost i sigurnost prenosa, veću efikasnost, bolju razmjenu snage, veću operativnu fleksibilnost i sve ostale pogodnosti koje nudi međusobno uvezivanje sistema. DC mreža pruža pristup svim učesnicima na tržištu, što uključuje obnovljive izvore električne energije koji su od izuzetnog značaja za sadašnje i buduće planove izrade prenosnih mreža.

Arhitektura DC mreže može biti serijska ili paralelna. Pošto serijska arhitektura ima brojne nedostatke, neće biti obrađena u ovom radu.

U paralelnoj arhitekturi DC mreže, pretvaračke stanice su spojene paralelno, te stoga rade sa istim naponom. DC mreža može biti radijalna ili upetljana.



Slika 7. Paralelna arhitektura: a) radijalne DC mreže, b) upetljane DC mreže

## 7. ZAKLJUČAK

Visokonaponski prenos jednosmjernom strujom je sigurna i efikasna tehnologija namijenjena za prenos velike količine električne energije na velike udaljenosti. Zbog svojih mnogobrojnih prednosti u odnosu na tradicionalne naizmjenične prenosne sisteme, HVDC sistemi veoma brzo rastu i postaju važan dio prenosnih mreža. Upotrebom IGBT tranzistora u HVDC tehnologiji počinje novo poglavlje u njenom razvoju. Dolazi se do HVDC tehnologije sa naponskim konvertorima, čime se povećava fleksibilnost ove tehnologije i njene primjene u prenosu električne energije. Konačno, pojava modularnih konvertora sa više nivoa ispostavila se kao najisplativiji koncept naponskih konvertora i kao takva postala izuzetno značajan aspekt daljeg razvoja HVDC tehnologije. Nadalje, usljed sve veće potrošnje električne energije i sve veće raznovrsnosti pri proizvodnji iste, javlja se potreba za međusobnim uvezivanjem HVDC sistema u mreže, koje pretenduju da u budućnosti budu globalnih razmjera.

## 8. LITERATURA

- [1] Dragan Jovcic, Khaled Ahmed, "High Voltage Direct Current Transmission: Converters, Systems and DC Grids", John Wiley and Sons Ltd, United States, 2015.
- [2] Chan-Ki Kim, Vijay K. Sood, Gil-Soo Jang, Seong-Joo Lim and Seok-Jin Lee, "HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems", John Wiley & Sons (Asia), Singapur, 2009.
- [3] Vijay K. Sood, "HVDC and FACTS Controllers Applications of Static Converters in Power Systems", Kluwer Academic Publishers, Boston, 2004.
- [4] Nemanja Savić, Vladimir Katić, "Overview of the Configuration and PowerConverters in High Voltage Direct Current Transmission Systems", Kladovo, Srbija, 2017.
- [5] Dražen Dujić, "MMC-BASED CONVERSION FOR MVDC APPLICATIONS", Indel, Banja Luka, 2018.
- [6] Nilanjan Ray Chaudhuri, Balarko Chaudhuri, Rajat Majumder, Amirnaser Yazdani "MULTI-TERMINAL DIRECT-CURRENT GRIDS Modeling, Analysis, and Control", John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2014.

### Kratka biografija:



**Miljan Ubiparip** rođen je u Stocu, BiH, 1991. godine. Srednju tehničku školu završava u Trebinju. 2017. godine završava osnovne akademske studije na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu na studijskom programu Energetika, elektronika i telekomunikacije. Nakon toga upisuje master akademske studije, usmjerenje Elektroenergetika – energetska elektronika i električne mašine.