

Projektovanje i simulaciona analiza primjene pretvarača energetske elektronike u HVDC sistemu

Miodrag Forcan

Elektrotehnički fakultet

Istočno Sarajevo, BiH

miodrag.forcan@live.com

Sadržaj—Projektovanje, bilo kog tipa HVDC prenosnog sistema, podrazumijeva upotrebu pretvarača energetske elektronike. Prvi dio rada ilustruje osnovne karakteristike HVDC sistema, potrebu za njegovom primjenom i varijante realizacije. U nastavku se razmatraju topologija i komponente primijenjenog pretvarača, a potom je izvršena i detaljna simulaciona analiza njegovog rada. U završnom dijelu je, uz priloženu simulacionu analizu, razmotren i mehanizam prenosa snage putem HVDC sistema.

Ključne riječi- HVDC (High Voltage Direct Current) ; LTT (Light Triggered Thyristor); 6-o pulsni pretvarač;

I. UVOD

U svojim ranim primjenama HVDC sistemi su bili ograničeni uslovima maksimalno podnosivih napona i struja korišćenih komponenti energetske elektronike. Brzim razvojem tehnologije u ovoj oblasti došlo je i do pojednostavljenja realizacije HVDC sistema. Upotreba tiristorskih ventila u strukturi HVDC pretvarača, sredinom prošlog vijeka, značila je prekretnicu u razvoju cijelog sistema. Visokonaponski jednosmjerni prenos (HVDC) posjeduje mnoge prednosti u odnosu na visokonaponski naizmjenični prenos (HVAC). Pomenute prednosti se odnose samo na specijalne slučajeve prenosa kao što su: povezivanje dvije AC mreže različitih nazivnih frekvencija, prenos snage podmorskom kablovskom vezom i prenos snage na veoma velike udaljenosti.

II. STRUKTURA I TIPOVI HVDC PRENOSA

HVDC sistem se obično sastoji iz dvije pretvaračke stanice, povezane sa dvije nezavisne AC mreže, te DC prenosne linije, koja može biti kablovska ili nadzemna. Osnovni tipovi HVDC prenosnog sistema su:

a) Jednostanični HVDC sistem (Back-to-Back)

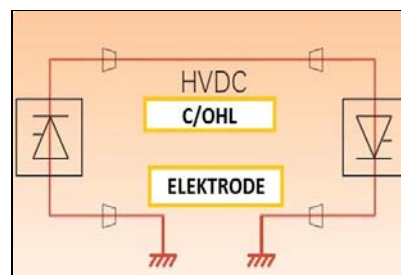
Ne postoji prenos snage na daljinu. Pretvarači se nalaze u istoj stanici. Služi za prilagođenje dva različita AC sistema.

b) Monopolarni HVDC prenos na daljinu

Koristi se za prenos snage na velike udaljenosti, osnovni tip DC veze je kablovski. Monopolarni tip prenosa sa zemljanim povratnim putem je prikazan na "Sl 1".

c) Bipolarni HVDC prenos na daljinu

Dobija se kombinacijom dva monopolarna sistema, koristi se za prenos velikih snaga.



Slika 1. Monopolarni HVDC prenosni sistem.

Povratni put kod monopolarnih HVDC sistema može biti i metalni. U slučaju zemljanog povratnog puta obavezna je upotreba metalnih elektroda.

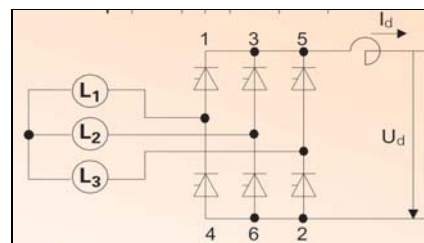
III. VRSTE PRETVARAČA U HVDC PRENOSU

U praksi su danas najzastupljeniji tiristorski pretvarači, ali u najskorije vrijeme se očekuje ekspanzija IGBT pretvarača na HVDC sisteme. U cilju fleksibilne funkcionalnosti sistema u pogledu promjene smjera prenosa snage, od primjenjenih pretvarača se zahtijeva rad kako u ispravljačkom tako i u invertorskom režimu rada. Postoje dva osnovna tipa tiristorskih pretvarača u HVDC sistemima:

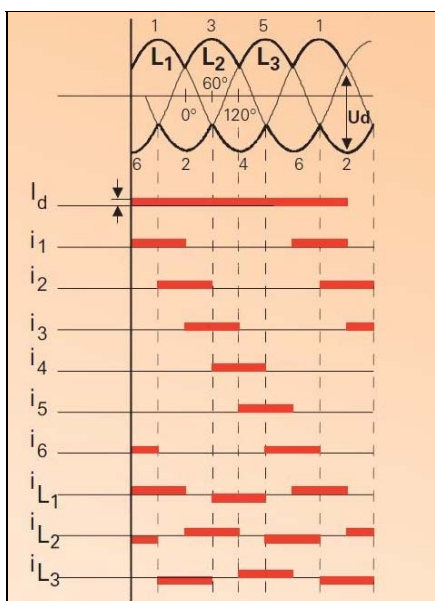
a) Tiristorski mosni 6-o pulsni pretvarač

Radi obezbjeđivanja prenosa vrlo visokih napona, pretvarač u sebi sadrži stotine tiristorskih komponenti vezanih u seriju.

"Sl 2" prikazuje topologiju i šemu vezivanja 6-o pulsnog pretvarača u HVDC sistemu. Na "Sl 3" je prikazan princip rada pretvarača.



Slika 2. Topologija 6-o pulsnog pretvarača i šema vezivanja na AC sistem.



Slika 3. Princip rada 6-o pulsno pretvarača.

Pretvarač sa "SI 2" se sastoji od šest tiristorskih ventila, označenih rednim brojevima od 1 do 6. Ventil je struktura koja se sastoji od velikog broja serijski povezanih tiristora sa odgovarajućim sistemom hlađenja. Povezivanje pretvarača sa AC sistemom mora biti preko prilagodnog transformatora.

Sa "SI 3" može se vrlo jednostavno sagledati princip rada 6-o pulsno pretvarača. Ventili vode u paru, jedan iz katodne grupe (1, 3 i 5) i jedan iz anodne grupe (2, 4 i 6). Svakom paru odgovara jedan linijski napon. Vodi onaj par tiristorskih ventila čiji je linijski napon najveći i koji ima okidne impulse. Područje mogućeg vođenja ventila je od trenutka $\alpha = 0^\circ$ do trenutka $\alpha = 180^\circ$. Svaki ventil se gasi kada se uključi naredni ventil iz njegove grupe (anodne ili katodne) ili kada mu struja padne na nulu. Napon na ventilu je jednak razlici anodnog i izlaznog napona. Struja koja se uspostavlja u sekundaru transformatora jednaka je razlici struja ventila one grane pretvarača na koju je sekundar priključen. Sa simbolom α označen je ugao paljenja tiristorskih ventila.

Promjenom ugla α mijenja se srednja vrijednost izlaznog napona. Određivanje zavisnosti srednje vrijednosti izlaznog napona od ugla paljenja ventila je jednostavan matematički postupak, čije sprovođenje se vrši na osnovu talasnog oblika izlaznog napona sa "SI 3". Jednačina (1) se jednostavno formira na osnovu činjenice da postoje tri linijska napona koja formiraju izlazni napon na jednom poluperiodu.

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha} V_{L1} d\theta. \quad (1)$$

Proračun se vrši na osnovu referentnog trenutka koji je pomjeren za električni ugao od 30° u odnosu na koordinatni početak, pa se dolazi do izraza (2).

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha} \sqrt{3} V_m \sin\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) d\theta. \quad (2)$$

Daljim postupkom se dolazi do relacije (3).

$$U_d = 234 \cdot V_{eff} \cos \alpha. \quad (3)$$

Iz gornje jednačine se jasno vidi da se putem promjene ugla α obavlja regulacija srednje vrijednosti izlaznog napona pretvarača, ali i odabir režima rada. Za vrijednosti α ispod 90° pretvarač radi u ispravljачkom režimu rada, a za vrijednosti iznad 90° zastupljen je invertorski režim rada.

b) Tiristorski mosni 12-o pulsni pretvarač

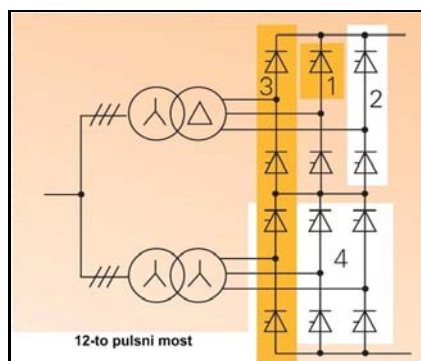
U projektovanju DC prenosa pri vrlo visokim naponima pretvarač se realizuje kao kombinacija dva 6-o pulsna pretvarača. Dobijena topologija i šema vezivanja na AC sistem su prikazani na "SI 4".

12-o pulsni pretvarač zahtijeva upotrebu dva trofazna sistema koja su pomjerena jedan u odnosu na drugi za 30° ili 150° stepeni u električnoj uglovnoj mjeri. Ovo se postiže postavljanjem dva transformatora sa spregama $Yy0$ i $Yd5$. Fazna razlika između trofaznih sistema efikasno eliminiše 5. i 7. harmonik struje na AC strani i 6. harmonik napona na DC strani. U isto vrijeme transformatori obezbjeđuju galvansku izolaciju čime je moguće u seriju povezati više mostova ukoliko je to potrebno za dati HVDC sistem. Osnovna izolacija transformatora je napregnuta i od strane AC visokog napona i od strane direktne potencijalne razlike između namotaja sa strane ventila i zemlje.

Na "SI 4" uočljivi su osjenčeni dijelovi koji su označeni brojevima od 1 do 4. Svaki osjenčeni dio predstavlja gradivnu jedinicu 12-o pulsno mosno pretvarača:

1. tiristorski ventil,
2. dupli tiristorski ventil,
3. ventilska kula,
4. 6-o pulsni mosni pretvarač.

Ventilska kula je posebno karakteristična struktura zbog toga što se na njoj uspostavlja maksimalni napon. Sastoji se od četiri ventila vezana u seriju. Moderni tiristori koji se koriste u HVDC sistemima imaju naznačeni napon blokiranja od nekoliko kV, pa je za realizaciju ventilske kule predviđene za napon od 500 kV potrebno nekoliko stotina tiristora vezanih u seriju. "SI 5" prikazuje ventilsku kulu proizvođača „Siemens“ sa montažom u pretvaračkoj stanici.



Slika 4. Topologija 12-o pulsno pretvarača i šema veziv. na AC sistem.



Slika 5. Ventiliska kula proizvođača „Siemens“.

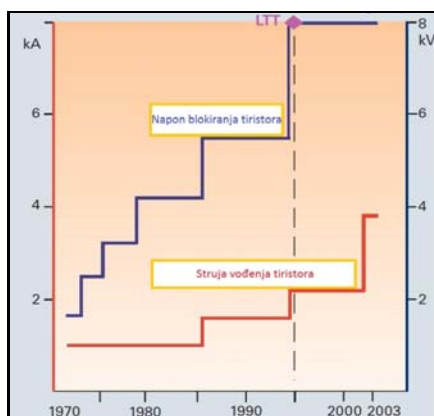
Za ovako velike napone ventiliska kula je mnogo glomazna i teška u mehaničkom pogledu, te se preporučuje njeno vješanje sa platforme na plafonu pretvaračke stanice pogotovo u oblastima koje su seizmički vrlo nestabilne.

IV. TIRISTORSKI VENTILI

Tiristori u ventilima su napravljeni od visoko-čistog monokristalnog silicijuma. Velika brzina razvoja energetske elektronike svakako je dovela do razvoja tiristora kao komponente u smislu povećanja napona blokiranja i struje vođenja. Današnji tiristori sa visokim performansama, koji se koriste u HVDC sistemima, posjeduju sljedeće karakteristike:

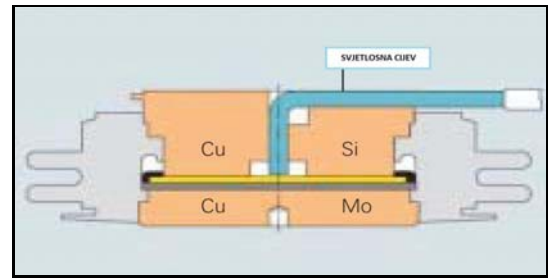
- prečnici silikonske pločice dostižu vrijednosti do 125 mm,
- naponi blokiranja tiristora mogu biti i do 8 kV,
- struje vođenja tiristora idu do vrijednosti 4 kA.

Zahvaljujući visokim strujama vođenja tiristora u HVDC sistemima ne postoji potreba za vezivanjem više tiristora u paralelne strukture. „SI 6“ prikazuje hronologiju razvoja tiristora kao komponente.



Slika 6. Hronološki razvoj tiristorske komponente.

Na „SI 7“ prikazana je struktura kućišta LTT-a zajedno sa fiber-optičkim kablom za prenos impulsa do pločice.

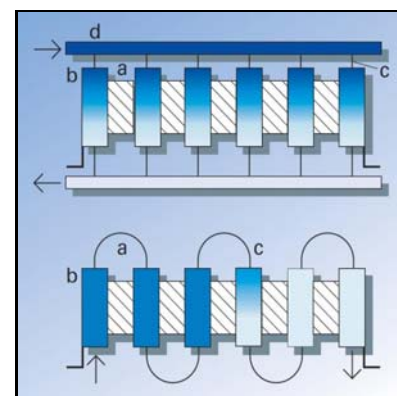


Slika 7. Kućište LTT-a sa priključkom fiber-optičkog kabla

Najveći skok u razvoju performansi tiristora odigrao se pojavom LTT komponente (Light- Triggered Thyristor). Radi se o tiristoru čije se okidanje gejta vrši fotonima umjesto elektronima. Upotreba ove relativno nove tehnologije smanjuje broj komponenti u tiristorskom ventilu čak i do 80%. Ovako pojednostavljeno okidanje rezultuje povećanjem pouzdanosti upravljanja radom ventila. Sa LTT tehnologijom svjetlosni impuls se sa gejta fiber – optičkim kablom prenosi kroz kućište tiristora direktno do tiristorske pločice čime je izbjegnuta upotreba dodatnih elektronskih kola i sistema napajanja potrebnih na visokim naponima. Potrebna snaga na gejtu je samo 40 mW. Svjetlošću okidani tiristori u sebi posjeduju ugrađenu prenaponsku zaštitu. Slika „SI 7“ takođe prikazuje unutrašnju strukturu tiristorskog kućišta koja se sastoji od bakra, silicijuma i molibdena. Molibden se dodaje zbog poboljšanja mehaničke čvrstoće kućišta.

Monitoring rada tiristora se ostvaruje pomoću jednostavnog kola, djelila napona sastavljenog od standardnih polica sa otpornicima i kondenzatorima (mješovito djelilo napona).

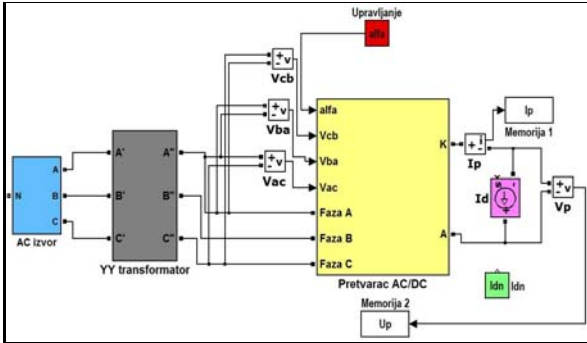
Hlađenje ventila se može ostvariti na različite načine, ali najefikasniji način hlađenja je razvijen od strane „Siemens“-a i radi na principu upumpavanja vode. Tiristori su posloženi u modul sa hladnjakom. U odnosu na princip dovođenja vode u module, postupak hlađenja može biti paralelni i serijski. Paralelno hlađenje obezbjeđuje istu temperaturu vode svim tiristorima. Na ovaj način je omogućen efikasniji rad komponenti. Osnovni tipovi hlađenja vodom su prikazani na slici „SI 8“.



Slika 8. Povezivanje tiristorskih modula u sistem hlađenja- paralelni tok (gore); serijski tok (dole), a) tiristor, b) hladnjak, c) cijevi za povezivanje, d) cijevovod.

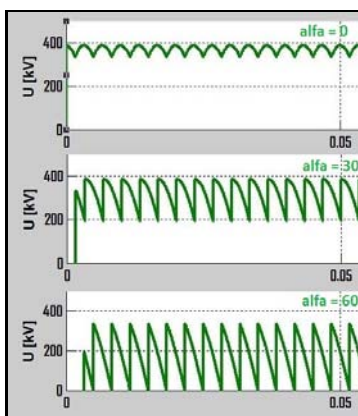
V. SIMULACIONA ANALIZA RADA 6-O PULSNOG PRETVARAČA

Sa osnovnim ciljem verifikacije rada 6-o pulsnoeg pretvarača izvršena je simulaciona analiza u programu MATLAB, okruženje Simulink. 6-o pulsni pretvarač mora da bude sposoban i za ispravljački i za invertorski režim rada. Simulaciona šema 6-o pulsnoeg pretvarača sa pretvaračkim transformatorom prikazana je na slici "Sl 9".

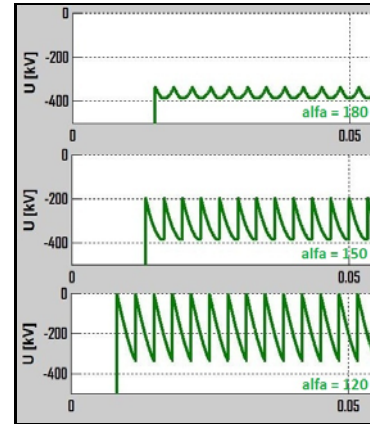


Slika 9. Simulaciona šema ventilskog 6-to pulsnoeg pretvarača u programu MATLAB.

Izvršeno je modelovanje trofaznog 275 kV-nog sistema (plava boja na slici), transformatora sprege zvijezda-zvijezda (siva boja na slici), ventilskog pretvarača sa upravljanjem (žuta boja na slici) i izlaznog strujnog opterećenja (roza boja na slici). Prema analogiji sa praktičnim HVDC projektom „Moyle“, nazivna struja iznosi 1000 A. Radi jednostavnosti simulacione analize smatra se da je DC struja prenosa idealno ravna i da ima konstantnu vrijednost. Upravljanje 6-o pulsним pretvaračem se vrši uz pomoć sinhronizacionog linijskog napona trofaznog AC sistema, kao što je teoretski ranije objašnjeno. Vrši se registracija izlaznog DC napona za različite vrijednosti ugla paljenja tiristora u cilju verifikacije modova rada pretvarača. Na naredne dvije slike: "Sl 10" i "Sl 11" prikazani su grafički rezultati simulacione analize za ispravljački i invertorski režim rada. Takođe su prikazani talasni oblici izlaznog napona za različite vrijednosti ugla paljenja ventila (alfa).



Slika 10. Izlazni napon pretvarača u ispravljačkom režimu rada za različite vrijednosti ugla paljenja ventila.



Slika 11. Izlazni napon pretvarača u invertorskom režimu rada za različite vrijednosti ugla paljenja ventila.

Na osnovu rezultata simulacije se može zaključiti da je izvršena verifikacija rada 6-o pulsnoeg pretvarača opisana relacijom (3). U ispravljačkom režimu rada povećanjem vrijednosti alfa smanjuje se srednja vrijednost izlaznog napona. U invertorskom režimu rada je obrnuto. Za vrijednost ugla alfa od 90° srednja vrijednost izlaznog napona je ravna nuli. U praktičnoj realizaciji HVDC sistema, sastavni dio pretvaračkih stanica čine i posebno projektovani filteri. Upotreba filtera je zastupljena i na AC i na DC strani sistema.

VI. INDUKTIVNI REAKTOR U HVDC SISTEMU

Osnovne funkcije reaktora za poravnanje talasnog oblika DC struje su:

- sprečavanje pojave naizmjenične struje,
- ograničenje nepravilnosti talasnog oblika DC struje,
- sprečavanje rezonance u DC kolu,
- redukovanje harmoničnih struja sa ograničenjem telefonskih smetnji.

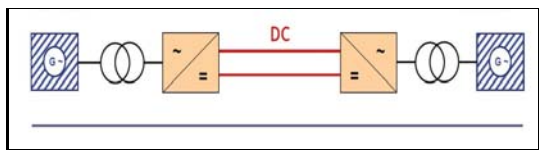
Naznačeni naponi i struje reaktora se biraju prema karakteristikama DC kola HVDC sistema. Od svih karakteristika pri projektovanju reaktora najvažniji je izbor induktivnosti reaktora. Za duge DC veze vrijednost induktivnosti reaktora se kreće u granicama od 100 do 300 mH. "Sl 12" prikazuje primjer realizacije induktivnog reaktora.



Slika 12. Reaktor sa vazdušnom izolacijom u HVDC proj. "Tian Guang".

VII. SIMULACIONA ANALIZA MONOPOLARNOG HVDC SISTEMA

U cilju verifikacije rada HVDC sistema prikazanog na "SI 1" urađena je simulaciona analiza. Princip rada monopolarnog HVDC sistema se može sagledati iz pojednostavljene šeme na "SI 13".



Slika 13. Pojednostavljena šema monopolarnog HVDC sistema.

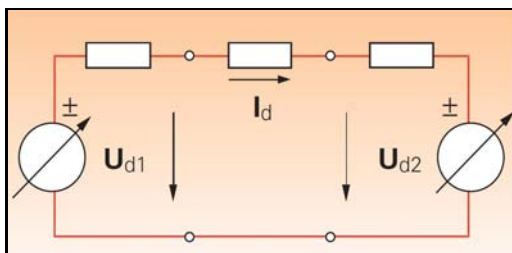
HVDC sistemi povezuju različite AC visokonaponske sisteme, koji u opštem slučaju ne moraju biti jednakih nominalnih frekvencija. Osnovna namjena ovakvog povezivanja je razmjena aktivne snage. Ukoliko dođe do povećane potrošnje snage u jednom AC sistemu, moguće je to kompenzovati snagom drugog AC sistema.

Struja kroz pol HVDC sistema se uvijek uspostavlja u jednom smjeru (zbog orijentacije tiristora). Intenzitet DC struje kroz HVDC sistem je promjenljiva veličina, a samim tim i intenzitet snage koja se prenosi. Pomenute veličine zavise od razlike potencijala na DC strani između pretvaračkih stanica, što se može jasno vidjeti sa "SI 14", koja predstavlja ekvivalentnu šemu DC dijela HVDC sistema. Pri simulacijama je smatrano da je vrijednost struje konstantna.

Promjena smjera prenosa snage se obavlja promjenom polariteta napona na izlazu iz pretvarača. Snaga se uvijek kreće od pretvarača u ispravljačkom režimu rada, prema pretvaraču u invertorskom režimu rada. Ilustracija smjera prenosa snage prikazana je na "SI 15".

Podaci za simulacionu analizu su birani po uzoru na realan sistem HVDC prenosa „Moyle“ između Škotske i Sjeverne Irske. Nazivni podaci HVDC prenosnog sistema „Moyle“ su:

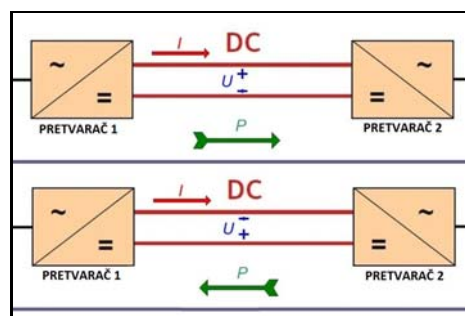
- 275 kV-ni AC napon,
- 250 kV-ni DC napon,
- 1 kA, DC struja.



Slika 14. Ekvivalentna šema DC dijela HVDC sistema.

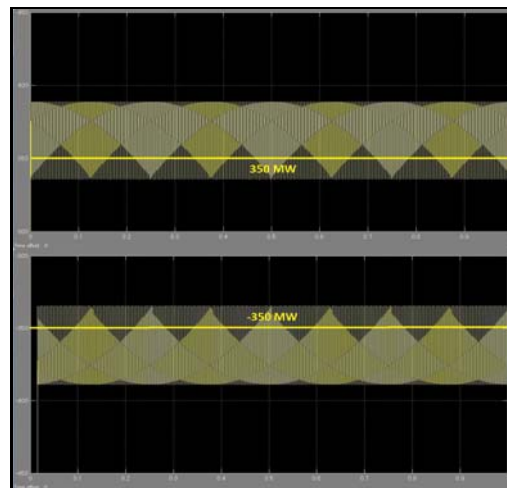
Ukoliko se snaga prenosi sa lijeva na desno, onda pretvarač 1 radi u ispravljačkom režimu rada, a pretvarač 2 u invertorskom režimu rada. Pri prenosu snage sa desna na lijevo pretvarači rade u obrnutim režimima rada. U prvom slučaju kao

simulacioni podatak za pretvarač 1 je biran ugao paljenja tiristora od 0° , a za pretvarač dva od 180° . U drugom slučaju uglovi paljenja tiristora su obrnuti za date pretvarače.



Slika 15. Smijer prenosa snage HVDC sistemom u zavisnosti od polariteta DC napona.

Za date uglove paljenja tiristora vremenska promjena snage je prikazana na "SI 16". Osnovni pokazatelj promjene smjera snage jeste promjena njenog znaka usljed promjene polariteta napona. "SI 16" istovremeno predstavlja rezultat simulacije u programu MATLAB sistema sa "SI 13".



Slika 16. Simulaciona verifikacija teorij. analize sa "SI 15" u MATLAB-u.

VIII. LITERATURA

- [1] Dennis A. Woodford, "HVDC Transmission", Manitoba HVDC Research Centre, 1998. god.
- [2] Siemens, "High Voltage Direct Current Transmission – Proven Technology for Power Exchange", 2007. god.
- [3] Radenko Ostojić, "Visokonaponski jednosmjerni prenos", INFOTEH-Jahorina Vol.8, Ref. F-14, p. 889-893, mart 2009. god.

IX. ABSTRACT

This paper presents design and basic principles of monopolar HVDC long-distance transmission system functioning. Usage of power converters in mentioned HVDC system is the main topic of this research. Through simulation analysis it is shown that usage of thyristor power converters represents proven technology for power exchange.

**Design and Modeling of Usage of Power Converters in
HVDC System**
Miodrag Forcan