

Pregled i primene topologija energetske pretvarača u sistemima prenosa električne energije

Željko V. Despotović

Institut "Mihajlo Pupin", Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
zeljko.despotovic@pupin.rs

Sažetak— U radu je dat pregled trenutnog statusa primene srednjenaponskih (SN) i visokonaponskih (VN) topologija energetske pretvarača i pripadajućih prekidačkih elemenata. Oblast energetske elektronike srednjih i visokih napona je već postala jedan od ključnih aktera u predstojećim tehničkim izazovima koje nameću pametne mreže, tzv. „*smart grid*“, koje omogućavaju maksimalnu propusnost snage, skoro trenutnu kontrolu struje i napona u svim delovima prenosnog elektroenergetskog sistema. Takođe ova oblast ima veoma bitan zadatak da uspostavi pouzdanu i fleksibilnu spregu između pojedinih delova prenosnog elektroenergetskog sistema i potrošačkog konzuma. Akcenat u radu je stavljen na topologije energetske pretvarača koje se odnose na sisteme fleksibilnog AC prenosa tzv. *Flexible AC transmission* (FACT) i DC sisteme prenosa, tzv. *High voltage DC transmission* (HVDC). Na kraju je dat prikaz nekih praktičnih primera prekidačkih elemenata i istaknuti su neki problemi koji nisu rešeni, predstojeći izazovi i mogući pravci daljeg razvoja u ovoj kompleksnoj oblasti.

Ključne reči—energetski pretvarači; energetska elektronika; visoki napon; HVDC; tiristor; IGBT;

I. UVOD

Istorija primene energetske elektronike i energetske pretvarača u sistemima prenosa i distribucije počinje davne 1954., kada su kao pretvarački sistemi po prvi put od strane švedske firme ASEA korišćeni brzi električni prekidači na bazi živinog luka u visokonaponskom (VN) prenosu jednosmerne struje, tzv. *high voltage DC* (HVDC) putem kablovskog prenosnog sistema 20 MW, 100 kV, 200 A između Švedske i ostrva Gotland. U narednim godinama je instalirano devet takvih sistema [1]-[2]. Sledeći značajan napredak došao je kada je prvi HVDC sistem baziran na visoko strujnim pretvaračima sa poluprovodničkim tiristorima, projektovan i pušten u rad 1970. Radi se o sistemu prenosa snage 1,44 MW, napona ± 400 kV, prenosna linija od Dalasa-Oregon do Los Anđelesa-Kalifornija. Ovaj projekat je realizovalo zajedničko preduzeće koju su formirali ASEA i General Electric Co [3].

Takođe kao rezultat pojave i primene poluprovodničkih prekidača tiristora, tzv. *silicon controlled rectifiers* (SCR), razvijeni su statički kompenzatori reaktivne snage (var kompenzatori), tzv. *static var compensators* (SVC), koji su delimično ili u potpunosti zamenili sinhronu kompenzatore bazirane na kondenzatorskim baterijama. HVDC i SVC su od

tada široko prihvaćeni u primenama fleksibilnih elektroenergetskih sistema (EES), kao pogodan i efikasan način kontrole tokova aktivne i reaktivne snage.

Brzim i dinamičnim promenama tržišnih uslova u elektroprivrednom sektoru i intenzivnim napretkom u oblasti poluprovodnika velike snage, odvija se revolucija u razvoju poluprovodničkih topologija u sistemima prenosa i distribucije (PID). Inovacije u oblasti velikih snaga i brzih poluprovodničkih prekidačkih elemenata kontrolisanih preko gejt priključka (IGBT prekidači), omogućavaju upotrebu najsavremenijih naponskih pretvarača, tzv. *voltage source converters* (VSC), sa potencijalnom primenom u sistemima od nekoliko MW do nekoliko 100 MW. Rezultat je bio zavidan, možda čak i spektakularan u smislu funkcionalnosti novih sistema, njihove primene i njihovih mogućnosti. Primena snažnih naponskih pretvarača u takvim sistemima se višestruko povećala u poređenju sa tradicionalnim strujnim pretvaračima snage, tzv. *current source converters* (CSC), a uglavnom na račun glomaznih pasivnih induktivnih komponenti koje u njima dominiraju.

Utjecaji na tržište električne energije u industrijalizovanom svetu koji su pružili jake podsticaje za dalje inovacije u oblasti energetske elektronike usmereni na primene u EES bi se mogli klasifikovati u tri grupe: (1) restrukturiranje tržišta usluga širom sveta, (2) propisi o zaštiti životne sredine i energetske efikasnosti, (3) utjecaji javnog mnjenja protiv velikih infrastrukturnih projekata i nadzemnih dalekovoda.

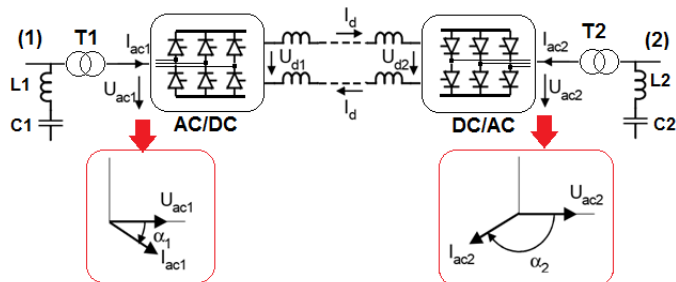
Restrukturiranje tržišta se ubrzava konkurencijom tako da nezavisni proizvođači električne energije, prenosnici i distributeri se zamenjuju regulisanim monopolima [4]-[5]. Novi propisi i javno mnjenje su, zahtevajući rešenja koja bi poboljšali korišćenje postojećih proizvodnih kapaciteta i obezbedili ekološki prihvatljive načine prenosa od manje centralizovanih proizvođača, otvorili novu eru koja stvara velike mogućnosti za poluprovodničke tehnologije velikih snaga. Kao rezultat masivnih istraživačkih i razvojnih napora, primena snažnih poluprovodnika i tehnologija su počele da donose značajne benefite [1].

U ovom radu je dat pregled poluprovodničkih topologija energetske pretvarača koje se koriste u aplikacijama EES i ključnih AC/DC i DC/AC sistema dostupnih za poboljšanje prenosa i distribucije električne energije. U radu se takođe

govori u nekim specifičnostima rada i funkcionalnosti HVDC sistema zasnovanih na VSC i SVC pretvaračkim sistemima.

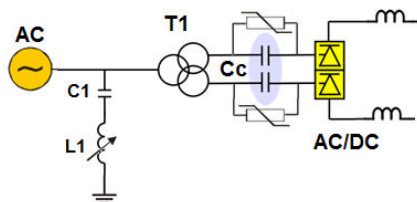
II. TOPOLOGIJE ENERGETSKIH PRETVARAČA U HVDC PRENOSU

Električni pretvarači snage koji su se prvo koristili u primenama u PID električne energije su bili zasnovani na SCR tehnologiji i strujnoj kontroli. To znači da je tok struje jednosmeran i da je vrednost DC struje određena naponskom ravnotežom između dva AC/DC energetska pretvarača koji su povezani preko zajedničkog DC voda. Na AC stranama putem SCR pretvarača se kontroliše faktor snage, uvođenjem faznog kašnjenja između napona i osnovne komponente linijske struje. SCR pretvarač troši reaktivnu snagu, koja je normalno balansirana proizvodnjom reaktivne snage u očno spojenoj banci pasivnog LC filtera, kao što prikazuje Sl.1.



Slika 1. Standardna HVDC topologija i fazorski dijagrami

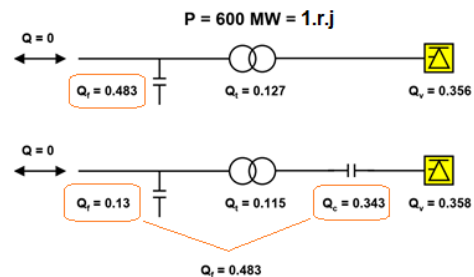
U novijim HVDC sistemima se koriste redni kondenzatori, odnosno kondenzatorski komutovani pretvarači čija je osnovna topologija data na Sl.2.



Slika 2. HVDC topologija bazirana na rednim kondenzatorim i SCR AC/DC pretvaraču

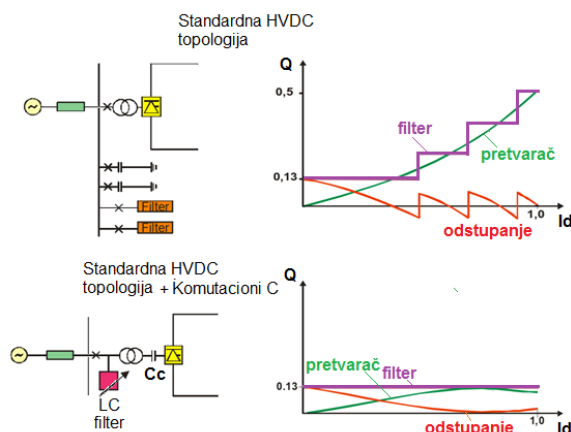
U ovom slučaju kondenzatori su deo komutacionog kola i smešteni su između tronamotajnog transformatora i SCR pretvarača. Reaktivna snaga kroz transformator pretvarača je minimizirana što smanjuje prividnu snagu transformatora. Struja kroz komutacione kondenzatore može se kontrolisati adekvatnim uključanjem SCR prekidača. Napon na kondenzatorima se kontroliše strujom punjenja kondenzatora. U ovom slučaju nema nulte komponente struje kroz kondenzatore na AC strani (sekundari tronamotajnog transformatora nisu uzemljeni). Naponski stres na komutacionim kondenzatorima je redukovana primenom adekvatnih prenaponskih zaštita, odnosno varistora.

Na Sl.3 je dat primer poređenja kompenzacije reaktivne snage na AC strani jednog prenosnog sistema snage $P=600$ MW ($=1$ r.j.) za slučaj standardne HVDC topologije i HVDC topologije bazirane na komutacionim rednim kondenzatorima.



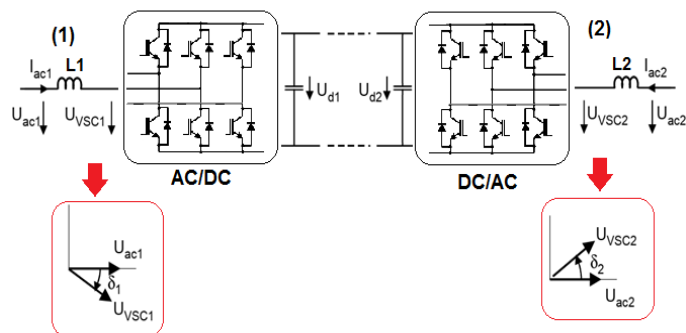
Slika 3. Primer poređenja kompenzacije reaktivne snage klasičnog HVDC sistema i HVDC sistema baziranog na komutacionim kondenzatorima

Na Sl.4 je dato poređenje balansiranja reaktivnih snaga promenom DC komponente struje za standardnu HVDC topologiju i HVDC topologiju sa komutacionim kondenzatorima.



Slika 4. Primer poređenja balansiranja reaktivne snage klasičnog HVDC sistema i HVDC sistema sa komutacionim kondenzatorima

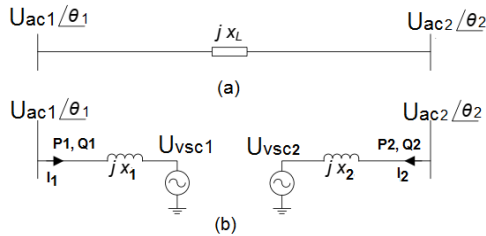
U novoj generaciji HVDC sistema zasnovanih na VSC, kontrolisanim naponskim izvorima baziranim na tranzistorskim pretvaračima sa dva nivoa, tzv. *two-level* (na obe strane (1) i (2) prenosnog sistema), je obezbeđena regulacija napona i kontrola tokova snaga (aktivne i reaktivne). Tranzistorska topologija HVDC sistema baziranog na VSC pretvaračima je prikazana na Sl.5.



Slika 5. Tranzistorska ("two-level") HVDC topologija bazirana na VSC

Na Sl.5 su prikazani fazorski dijagrami napona U_{ac} i U_{VSC} na terminalima (1) i (2) prenosne linije. Od čvorova prenosa

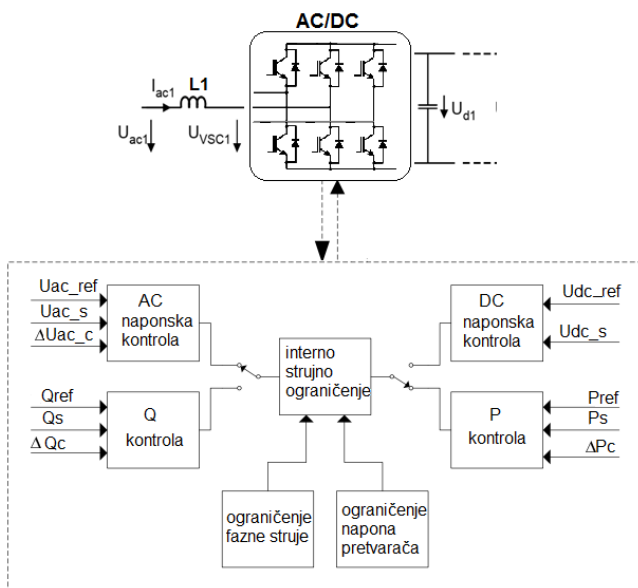
sistem VSC-HVDC se može posmatrati kao sinhrona mašina bez inercije gde su proizvodnja ili potrošnja aktivne snage nezavisne od proizvodnje ili potrošnje reaktivne snage. Ovo tumačenje vodi ka modelovanju VSC-HVDC sistema prenosa kao dva kontrolisana naponska izvora U_{VSC1} , U_{VSC2} , koji su redno preko reaktansi X_1 , X_2 (slično sinhronom generatoru bez inercije) spojeni sa čvorovima prenosnog sistema, kao što je prikazano na Sl.6. Na Sl.6(a) je data predstava klasične AC prenosne linije gde su čvorovi povezani preko reaktanse X_L , dok je na Sl.6(b) prikazan HVDC-VSC prenos.



Slika 6. Modelovanje HVDC topologije bazirane na VSC; (a) standardni AC prenos, (b) HVDC-VSC prenos

Naponi u čvorovima AC sistema prenosa U_{ac1} , U_{ac2} su određeni amplitudom i fazom. Na osnovu njih je određena struja u prenosnom vodu u skladu sa utvrđenom naponskom razlikom na induktivnosti X_L . U slučaju HVDC sistema prenosa, sistem se raspoređuje na dva podsistema u kojima je induktivnost vezana između VSC i čvorova (1) i (2) AC mreže. Na taj način, svaki AC naponski terminal poseduje dva stepena slobode, koji se mogu koristiti za kontrolu tokova aktivne i reaktivne snage ili ekvivalentnog toka aktivne snage i napona priključenog u AC čvoru.

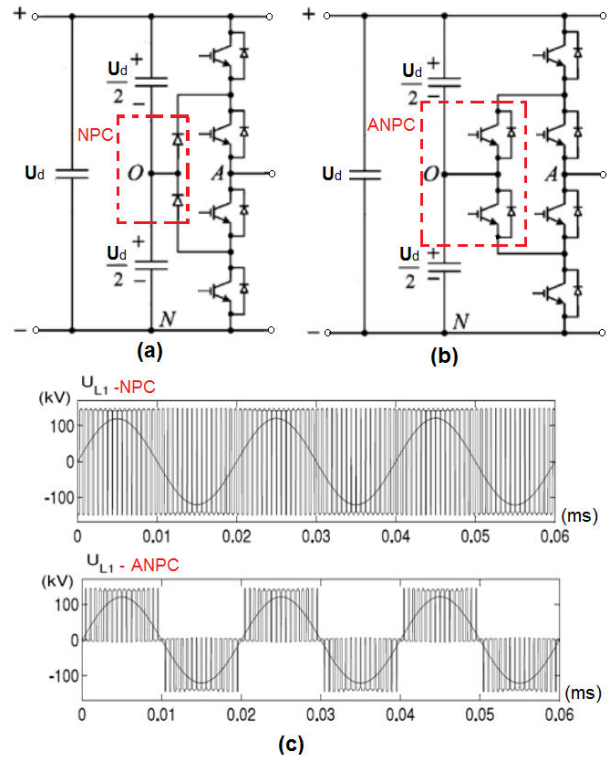
Na Sl.7 je data principiska blok šema dvostepene HVDC-VSC topologije: (1) sa AC naponskom kontrolom i kontrolom aktivne snage P i (2) DC naponskom kontrolom i kontrolom reaktivne snage Q, u literaturi poznat kao *Light Open Model* [6].



Slika 7. Principiska blok šema kontrole HVDC-VSC sistema

Upotreba VSC eliminiše potrebu za unutrašnjom elektromotornom silom u priključnoj mreži i takvi pretvarači mogu biti efikasni za napajanje mreža koje imaju nedovoljan proizvodni kapacitet. Bilans reaktivne snage može biti uspostavljen pravilnom kontrolom VSC i ne zahteva eksterne elemente ili aparate. Generisanje viših harmonika iz VSC se održava na niskom nivou učestanosti, zbog visoke prekidačke učestanosti koja se koristi u VSC.

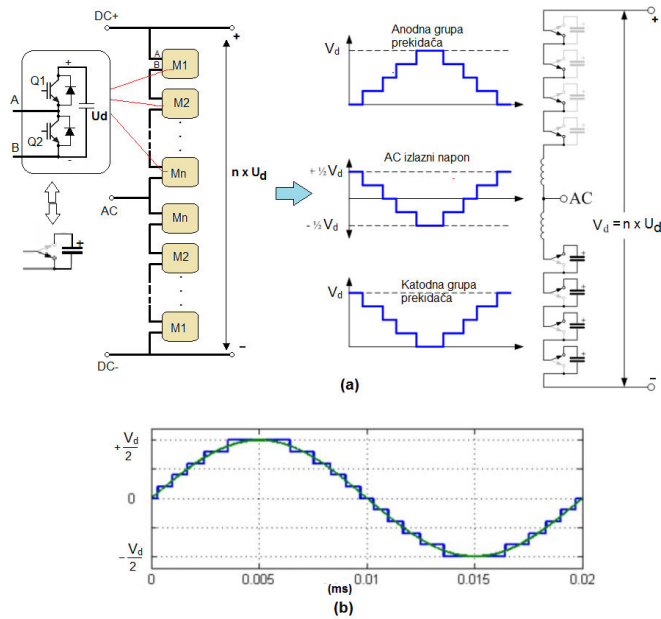
Umesto topologije pretvarača sa dva nivoa (šest IGBT prekidača u trofaznom mostu) u novije vreme, u skladu sa naponskim zahtevima i zahtevima prenosa snage, se koriste topologije sa više nivoa, tzv. „multi-level“ topologije. Tipične topologije naponskih pretvarača sa tri nivoa, koje koriste serijski povezane IGBT prekidače u cilju deljenja visokog napona blokiranja su prikazane na Sl.7. Na Sl.7(a) je prikazana topologija IGBT pretvarača sa tri nivoa i sa spojnim diodama i spregnutom neutralnom tačkom, tzv. *neutral point-clamped* (NPC) i na Sl.7 (b) NPC topologija, u okviru koje su umesto spojnih dioda iskorišćeni prekidački tranzistori, odnosno aktivna NPC (ANPC) topologija. Na Sl.7(c) su prikazani karakteristični talasni oblici linijskih napona za ove dve topologije bazirane na modulaciji širine impulsa, odnosno PWM.



Slika 8. Principiska šema topologije IGBT pretvarača sa tri nivoa; (a) NPC, (b) ANPC, (c) karakteristični talasni oblici linijskih napona

Glavne problemi u primeni pomenutih topologija u HVDC sistemima leže u poteškoćama balansiranja napona na DC kondenzatorima, neujednačeni gubici na pojedinim prekidačima (naročito vezano za NPC topologiju) i složeno upravljanje prekidačkim elementima. ANPC je atraktivno rešenje za HVDC primene jer toleriše neravnomernu distribuciju gubitaka.

U novije vreme u HVDC primenama dobijaju na značaju kaskadne modularne topologije sa više nivoa [7]-[9]. U ovom slučaju je zbog kaskadne veze moguće obezbediti rad na višim naponskim nivoima ($n \times U_d$). Prikaz jedne tipične kaskadne topologije je dat na Sl.9.



Slika 9. Principijska šema modularne kaskadne IGBT topologije sa više nivoa; (a) prikaz kaskade i pojedinačne ćelije IGBT modula, (b) karakteristični talasni oblik linijskog napona

U poređenju sa prethodna dva tipa pretvarača sa tri nivoa, u ovom slučaju ne postoji zajednički kondenzator na DC sabirnicama, već svaka od IGBT ćelija (kojih ima ukupno n) ima svoj DC kondenzator koji je na niskom naponu. Kao što je prikazano na Sl.9(a) svaka od ćelija sadrži dva IGBT prekidača (Q1 i Q2) i ona ima tri stanja: (1) kada je Q1 uključen i Q2 isključen kondenzator je uključen u kolo i u ovom slučaju modul doprinosi kvant napona koji se preslikava na fazni napon, (2) kada je Q1 isključen i Q2 uključen, kondenzator se zaobilazi, i tada je ćelija kratko spojena (3) kada su Q1 i Q2 isključeni IGBT ćelija je blokirana.

Prikazana kaskadna modularna topologija je povoljnija za HVDC aplikacije u odnosu na topologije sa dva ili tri nivoa, jer kaskadni način povezivanja dozvoljava da se svaka ćelija teoretski uključuje i isključuje jednoj u periodi, što u velikoj meri smanjuje prekidačke gubitke.

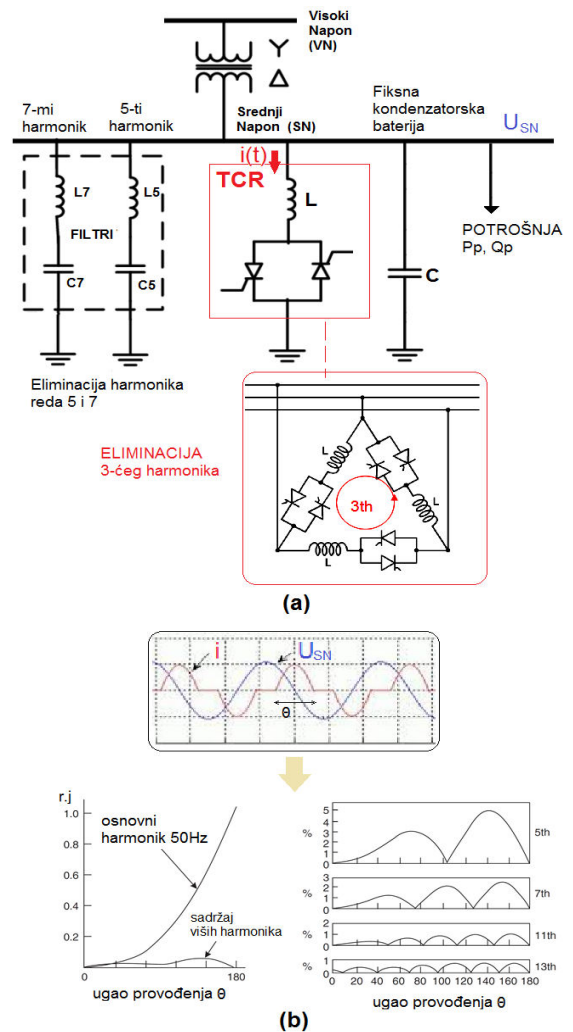
Kao što pokazuju talasni oblici na Sl.9(a) i Sl.9(b), izlazni talasni oblik je stepenast i može biti blizak sinusnom, kada je broj ćelija dovoljno veliki (obično više od 100 ćelija po jednoj kaskadi se primenjuje u HVDC sistemima). Ovo rezultuje niskim sadržajem harmonika napona, što podrazumeva da AC filter, koji se inače koristi kod topologije na Sl. 1, više nije potreban.

III. TOPOLOGIJE ENERGETSKIH PRETVARAČA U STATIČKIM KOMPENZATORIMA REAKTIVNE ENERGIJE

Da bi se obezbedilo upravljanje sistema naizmeničnog prenosa potrebno je zadovoljiti dva osnovna cilja: kontrolu

tokova aktivnih snaga u mreži i kontrolu napona u čvorovima mreže. Prvi cilj je određen globalnom ravnotežom između proizvodnje i potrošnje električne energije u sistemu. Ovu ravnotežu prati i kontrolise dispečing prenosnog sistema. Drugi cilj, kao i profil napona, se odražava na lokalnu ravnotežu između proizvodnje i potrošnje reaktivne snage koja se ima kako na potrošnji, tako i sistemu prenosa[2].

Opšte je pravilo da potrebna brzina kontrole mnogo veća u slučaju kontrole reaktivne snage nego u slučaju aktivne snage. Stoga, kada su 70-ih godina poluprovodničke komponente (pre svega tiristori) postali dostupni za aplikacije velike snage, počela je u ranoj fazi primena ove opreme za automatsku kontrolu reaktivne snage. Jedna takva topologija statičkog kompenzatora reaktivne snage, u kojima se koristi dobro poznati koncept tiristorski kontrolisanog reaktora (TCR) je prikazan na Sl. 10.

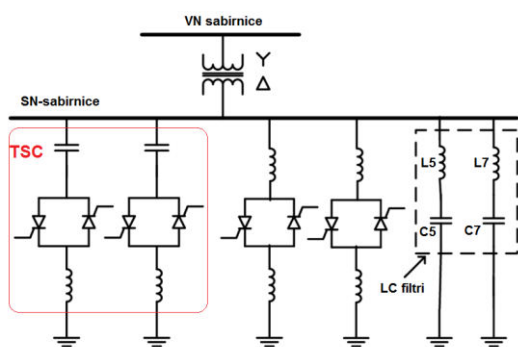


Slika 10. Principijska šema srednjenaponskog TCR statičkog kompenzatora reaktivne energije; (a) prikaz osnovne topologije, (b) karakteristični talasni oblici i udeo viših harmonika struje

Kao što je prikazano na Sl.10(a), ovi sistemi su zasnovani na korišćenju fiksne pasivne kondenzatorske banke i tiristorski kontrolisanih prigušnica sa anti-paralelnom spregom tiristora. Kondenzatorska banka ima mogućnost generisanja maksimalno

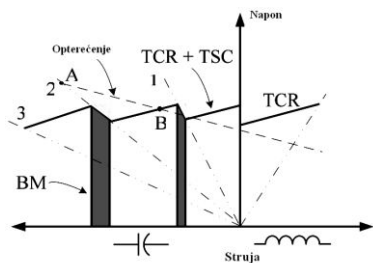
potrebne reaktivne snage. Tiristorski kontrolisana induktivna grana u svakom trenutku troši višak od generisane reaktivne snage od kondenzatorske baterije, a koju ne zahteva potrošnja. Prigušnice sa gvozenim jezgrom su glomazne i mogu prouzrokovati značajne gubitke, što predstavlja nedostatak ove topologije. Tiristori se prevashodno koriste za regulaciju osnovne komponente struje koja protiče kroz induktor. Veoma bitna napomena je da se prvi dominantni viši harmonik (treći harmonik struje TCR) zatvara unutar trougla tiristorskog pretvarača i nema ga u mrežnoj struji. Generisani viši harmonici struje se eliminišu projektovanjem i ugradnjom LC pasivne grupe filtera, najčešće za eliminaciju dva dominantna viša harmonika (harmonici reda 5 i 7). Talasni oblici struje i napona TCR, kao i harmonijski sadržaj u zavisnosti od ugla provođenja tiristora θ , su dati na Sl.10(b).

Veoma često se za poboljšanje opsega TCR kontrole koriste kondenzatori sa tiristorskim prekidačima, tzv. *thyristor switched capacitor* (TSC). Prikaz jedne tipične TSC topologije je dat na Sl.11.



Slika 11. Principijska šema srednjenaponskog TSC-TCR statičkog kompenzatora reaktivne energije

Ako je potrebno da se vrši apsorpcija reaktivne snage, baterija kondenzatora je isključena i kompletnu ulogu prijema reaktivne snage ima tiristorski kontrolisana prigušnica, odnosno TCR. Koordinacijom kontrole između prigušnice i kondenzatorskih stepeni moguće je dobiti kontinualnu tzv. „stepless“ kontrolu. Na Sl.12 je prikazana tipična V-I karakteristika ovog tipa kompenzatora reaktivne energije sa naznačenim kapacitivnim i induktivnim opsezima.



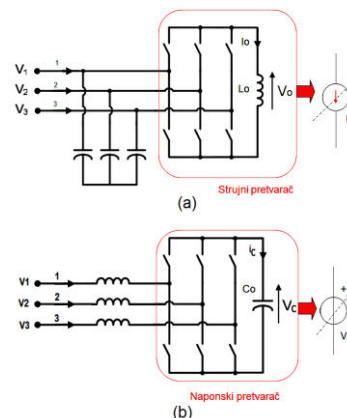
Slika 12. Naponsko-strujna karakteristika TCR i TSC kombinacije za kompenzaciju reaktivne snage

Pomenuti statički kompenzatori se karakterišu: (1) kontinualnom kontrolom, praktično bez tranzijenata, (2) niskim generisanjem harmonika (pošto je reaktivna snaga

kontrolisanog reaktora relativno mala), (3) velikom fleksibilnošću rada i kontrole. Glavni nedostatak im je relativno visoka cena u odnosu na TSC i TCR pojedinačno.

U novije vreme značajan napredak u kompenzaciji reaktivne energije postižu prekidački pretvarači bazirani na IGBT topologijama. Ideja za primenom ovih tipova pretvarača je proistekla iz činjenice da se generiše ili apsorbuje reaktivna energija, ali bez upotrebe velikih (glomaznih) i „zahtevnih“ baterija kondenzatora ili prigušnica. Primenom ovih topologija energetskih pretvarača se značajno smanjuju troškovi koji se odnose na pasivne komponente, koje su uz što su glomazne, još i dodatno skupe. Olakšavajuća činjenica u primeni prekidačkih topologija je ta, što se cene snažnih elektronskih komponenata i pripadajuće upravljačke elektronike nalaze u stalnom opadanju. Na tehnološkom tržištu ovih prekidačkih sistema za kompenzaciju reaktivne energije, se izdvaja nekoliko rešenja, odnosno pristupa rešavanju pomenutih tehničkih problema.

Standardni načini kompenzacije reaktivne energije, bazirane na primeni tranzistorskih elektroenergetskih pretvarača podrazumevaju korišćenje dve osnovne topologije kompenzatora: (1) topologija sa strujno kontrolisanim tranzistorskim pretvaračima, (2) topologija sa naponski kontrolisanim tranzistorskim pretvaračima (prikaz je dat na Sl.13).



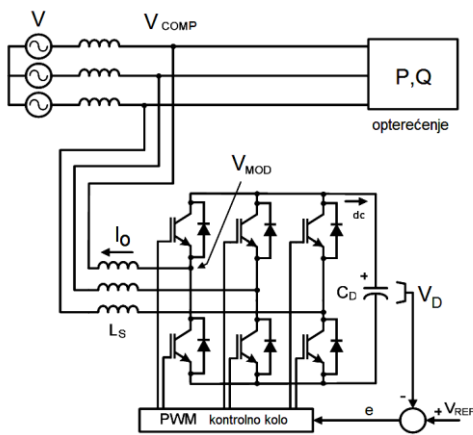
Slika 13. Prekidačke topologije kompenzatora reaktivne energije; (a) strujna CSC, (b) naponska VSC

Osnovni elementi strujne topologije koja je prikazana na Sl.13(a) su ulazni kapacitivni filter, fiksnog kapaciteta i izlazni punomosni prekidački (tranzistorski) pretvarač sa regulacijom struje kroz prigušnicu L_o , koja ustvari predstavlja opterećenje mosnog prekidačkog pretvarača. Prigušnica L_o se dimenzioniše tako da se cela grana u kojoj se ona nalazi, ponaša kao kontrolisani strujni ponor struje I_o . Izlazni napon pretvarača je V_o .

Osnovni elementi naponske topologije koja je prikazana na Sl.13(b) su ulazni induktivni filter, fiksne vrednosti induktivnosti i izlazni punomosni prekidački pretvarač sa regulacijom napona na izlaznom kondenzatoru C_o , koji ustvari predstavlja opterećenje prekidačkog pretvarača. Kondenzator C_o se dimenzioniše tako da se cela grana u kojoj se on nalazi, ponaša kao kontrolisani naponski izvor napona V_c . Struja punjenja kondenzatora je označena sa I_c .

Prethodno pomenute topologije prekidačkih kompenzatora pripadaju klasi tzv. „samo-komutujućih“ („*self-commutated*“). Njima je moguće obezbediti: stabilizaciju prenosnog sistema, poboljšanje naponske regulacije, popravku faktora snage, korekciju i kompenzaciju debalansa opterećenja i slično.

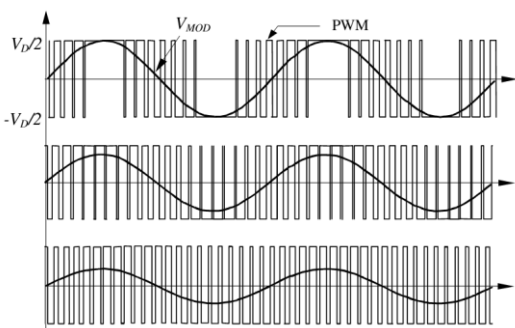
Na Sl.14. je prikazana topologija prekidačkog kompenzatora bazirana na naponskom IGBT pretvaraču (trofaznom podizaču napona- tzv. „*boost*“). Ovaj pretvarač obezbeđuje kontrolu faznog pomeraja između napona na opterećenju V_{COMP} i napona na izlazu prekidačkog pretvarača V_{MOD} . Kontrola reaktivne energije (odnosno snage) se ostvaruje podešavanjem amplitude osnovne komponente izlaznog napona pretvarača V_{MOD} .



Slika 14. Statički kompenzator baziran na prekidački kontrolisanom naponskom pretvaraču VSC

Napon V_{MOD} je dobijen implementacijom pripadajućeg upravljačkog PWM kola i odgovarajućeg PWM algoritma. Stabilizacija napona na kondenzatoru C_D je ostvarena merenjem napona V_D na kondenzatoru, poređenjem sa zadatom (referentnom) vrednošću V_{REF} uz primenu odgovarajućeg PWM upravljačkog kola, na čiji ulaz se dovodi signal greške e .

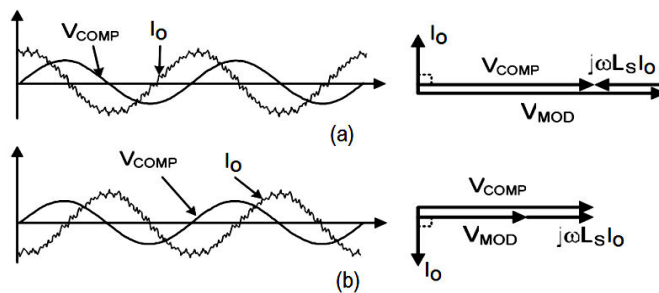
Talasnici napona kompenzatora V_{MOD} i upravljačkog PWM signala za različite vrednosti modulacionog indeksa su prikazani na Sl.15.



Slika 15. Talasni oblici izlaznog napona prekidačkog kompenzatora za različite vrednosti modulacionog indeksa

U radu ovog tipa prekidačkog kompenzatora razlikujemo dva režima: (1) režim kada kompenzator generiše reaktivnu energiju i (2) režim kada kompenzator apsorbuje reaktivnu

energiju. U prvom slučaju je kompenzator ekvivalentan bateriji kondenzatora, dok je u drugom slučaju ekvivalentan prigušnici. Talasni oblici karakterističnih veličina (napona i struje) i odgovarajući fazorski dijagrami za ova dva slučaja su prikazani na Sl.16.



Slika 16. Talasni oblici struje i napona i pripadajući fazorski dijagrami za kompenzator sa Sl.14

Slučaj I koji je prikazan na Sl.16(a) – Kada je $V_{MOD} > V_{COMP}$, prekidački kompenzator generiše reaktivnu energiju (ekvivalentan je bateriji kondenzatora). Slučaj II koji je prikazan na Sl.16(b) – Kada je $V_{MOD} < V_{COMP}$ prekidački kompenzator apsorbuje reaktivnu energiju (ekvivalentan je induktivnosti).

Dakle princip rada ovog kompenzatora je sličan radu sinhronne mašine, koja radi u režimu sinhronne kompenzacije i to u dva režima rada, pod-pobudeni i nad-pobudeni. Kompenzaciona struja I_o će prednjačiti ili kasniti zavisno od odnosa napona V_{MOD} i V_{COMP} , kao što je prikazano na Sl.16. Amplituda izlaznog napona kompenzatora V_{MOD} je kontrolisana promenom modulacionog indeksa ili promenom amplitude jednosmernog (DC) napona V_D .

Relativno brz odziv se postiže promenom modulacionog indeksa. Jednosmerni (DC) napon pretvarača se menja podešavanjem u malim iznosima aktivne snage apsorbovane od strane pretvarača:

$$P = \frac{V_{COMP} \cdot V_{MOD}}{X_s} \cdot \sin \delta \quad (1)$$

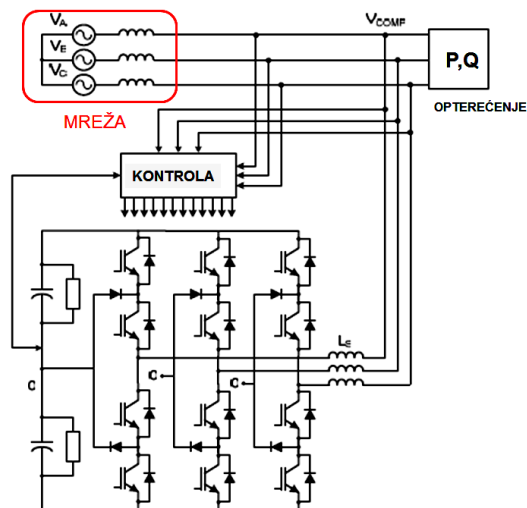
Gde su:

X_s - reaktansa sprežne prigušnice L_s

δ - fazni ugao između V_{MOD} i V_{COMP} .

Jedan od glavnih problema koji ograničavaju primenu prethodno opisanih topologija energetske pretvarača u SN i VN sistemima su limiti performansi poluprovodničkih tranzistorskih prekidača (IGBT ili IGCT), raspoloživih na tržištu. Realni poluprovodnički prekidači snage su dimenzionisani za struje do nekoliko kA i za maksimalne napone 6kV (maksimalno 10kV). Ove performanse nisu dovoljne za visokonaponske aplikacije. Problem može biti adekvatno rešen sofisticiranim topologijama prekidačkih pretvarača od kojih je najpoznatija, već opisana tzv. „*multilevel*“ topologija.

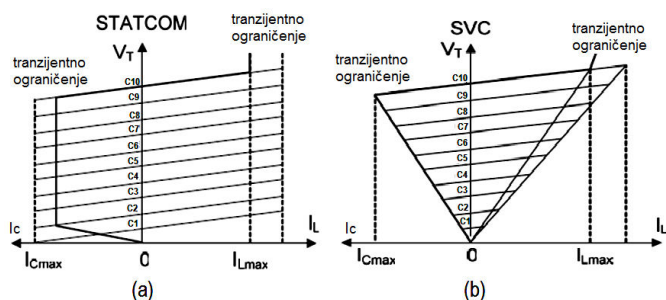
Na Sl.17 je prikazana najčešće korišćena topologija sa tri nivoa i sa spregnutom neutralnom tačkom (tzv. „*tree level neutral point clamped – 3L NPC*“).



Slika 17. Multilevel topologija (sa tri nivoa) kompenzatora reaktivne energije

U poređenju sa tiristorskim kompenzatorima, prekidački kompenzatori imaju niz prednosti: mogu proizvoditi aktivnu i reaktivnu snagu, redukovana je mogućnost pojave rezonance i njenih pratećih efekata. Obzirom da imaju brz odziv, reaktivna snaga će biti kontrolisana kontinualno i sa relativno velikom brzinom. Visokofrekventna (VF) modulacija širine impulsa rezultuje niskim harmonicima napona i struje, a takođe ovim se redukuje veličina i težina (a prema tome i cena) komponenata filtera. Dinamičke performanse usled varijacija mrežnog napona su značajno poboljšane, značajno bolji je tranzijentni odziv i stoga maksimalne performanse. Ovo za posledicu ima širi radni opseg u V-I dijagramu (slično kao *Mordejeve* krive kod sinhronne mašine).

Na Sl.8 je dato poređenje tipičnih V_T -I karakteristika (tzv. *Mordejeve* V karakteristike) za prekidačke statičke kompenzatore-STATCOM) i tiristorski kontrolisane kompenzatore-TCR.



Slika 18. Uporedni pregled V-I krivih za dva tipa kompenzatora reaktivne energije; (a) prekidački STATCOM, (b) tiristorski TCR

Na osnovu prikazanih karakteristika se zaključuje da je strujni opseg STATCOM kompenzatora značajnije širi od TCR kompenzatora, zbog šireg opsega tranzijentnih strujnih ograničenja, kako za kapacitivnu tako i induktivnu reaktansu. Ovo je naročito izraženo pri manjim naponima V_T .

Kao što je pokazano u poglavlju III, statički kompenzatori reaktivne snage nove generacije, poput HVDC pandana, su

zasnovani na VSC, koristeći funkcionalno identične koncepte glavnog pretvaračkog kola. Međutim, u ovim kompenzatorima DC veza nije spojena eksterno (HVDC prenosna linija), tako da se njen naponski nivo se može slobodno birati i dodatno optimizovati, obzirom na primenu prikazane VSC topologije. U ovim slučajevima se obično se radi o DC naponima u opsegu od ± 10 kV do ± 35 kV.

Na osnovu prethodno rečenog se zaključuje da glavna ograničenja u primeni energetske elektronike u sistemima prenosa električne energije potiču od ograničenja maksimalnih performansi prekidačkih elemenata na kojima su ovi sistemi bazirani. Stoga će u nastavku biti u kratkim crtama dati trenutni status i dalji pravci razvoja prekidačkih elemenata koji se koriste u prethodno navedenim aplikacijama energetskih pretvarača.

IV. PREKIDAČKI ELEMENTI U PRETVARAČKIM SISTEMIMA ZA PRENOS ELEKTRIČNE ENERGIJE

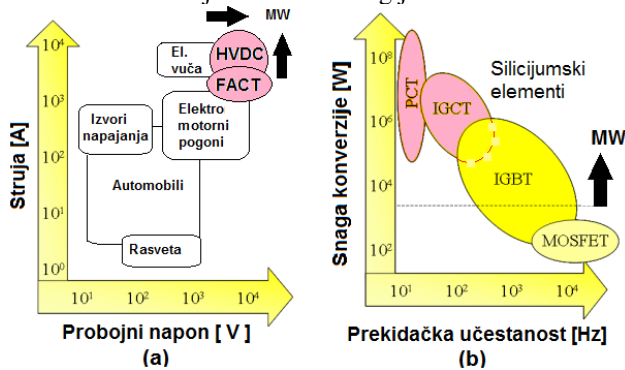
Revolucija i napredak energetske elektronike u poslednjim decenijama su favorizovali njenu primenu u sistemima proizvodnje, prenosa i distribucije električne energije, kao i u oblastima upravljanja ovim sistemima. U osnovi ovog napretka su energetske poluprovodničke uređaji koji imaju glavni zadatak da modulišu protok energije u skladu sa zahtevima aplikacije. Energetski poluprovodnici uopšteno pokrivaju sve veći broj primena što je zauzvrat omogućilo kontinuitet u poboljšanju performansi pretvaračkih uređaja. Topologije energetskih pretvarača koje se koriste u MW opsegu, predstavljaju relativno mali ali važan tržišni sektor za poluprovodničke komponente. Njihov napredak u velikoj meri zavisi od tehnologije. Tehnologije koje su bile razvijene u početku su se odnosile na aplikacije manjih snaga, a zatim su skalirane i optimizovane tako da pripadajuće poluprovodničke komponente izdržavaju relativno velike napone i struje, u cilju ispunjavanja konačnih zahteva za pretvaračkim uređajima većih snaga [10].

„Pametne mreže“, tzv. „*smart grids*“ je često terminologija koja se koristi kao evolutivni korak za modernizaciju sistema za PID. HVDC prenos i FACT sistemi predstavljaju dva glavna systemska nivoa koji omogućavaju postizanje prethodno navedenih ciljeva [11]-[12]. Obe aplikacije pripadaju opsegu velikih snaga (> 1 MW), u poređenju sa ostatkom brojnijih aplikacija manje snage (standardni izvori napajanja, električna rasveta, elektromotorni pogoni i električna vuča i automobilska industrija), kao što je prikazano na preglednom dijagramu na Sl.19.

Kao što se vidi u prikazu na Sl.19, u MW opsegu dominiraju tri tipa snažnih prekidačkih uređaja: fazno kontrolisani tiristor (engl. *Phase Controlled Thyristor*-PCT), komutovani tiristor sa integrisanim gejtom (engl. *Integrated Gate Commutated Thyristor* -IGCT) i bipolarni tranzistor sa izolovanim gejtom (engl. *Insulated Gate Bipolar Transistor* - IGBT).

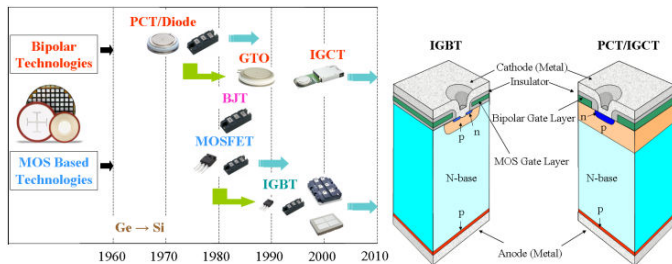
Topologije bazirane na poluprovodničkim prekidačima snage koji se koriste u strujnim (CSC) i naponskim (VSC) AC/DC i DC/AC energetskim pretvaračima za prenos snage i energije su u značajnijom meri određeni rastojanjem i nivoima

snage prenosa. Za velike udaljenosti i prenos električne energije od više stotina MW do nekoliko GW, klasične CSC topologije zasnovane na PCT se široko primenjuju, zbog manjih ukupnih sistemskih gubitaka. Za relativno manje udaljenosti i nivoe snage ispod GW, VSC zasnovani na IGBT prekidačima, dobijaju na značaju, a pogotovu uvođenjem distribuiranih obnovljivih izvora energije u sistem.



Slika 19. Energetski prekidački elementi; (a) oblasti primene, (b) opseg performansi

Na Sl.20. je dat prikaz osnovne strukture i evolutivni razvoj PCT, IGCT i IGBT prekidača snage. Ove tri visokonaponske poluprovodničke komponente su pretrpele značajne modifikacije u prethodne tri decenije. PCT i IGCT su bipolarni uređaji koji rade u tiristorskom režimu koji je okarakterisan povoljnom distribucijom viška nosilaca u stanju provođenja („on-state“). Dok je IGBT ustvari MOS kontrolisani element sa bipolarnim efektom, za postizanje niskih gubitaka u stanju uključenosti.

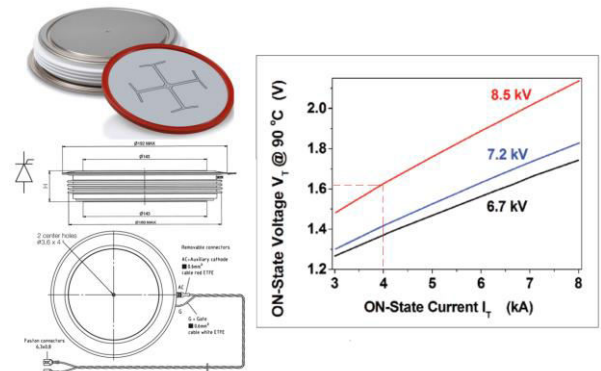


Slika 20. Evolutivni razvoj snažnih poluprovodničkih prekidača koji se primenjuju u sredjenaponskim i visokonaponskim energetskim pretvaračima [10]

U poređenju sa IGCT i IGBT prekidačima, PCT nije upravljiv element pri isključenju, ali je dobar izbor za mrežom vođene energetske pretvarače u HVDC sistemima, zbog relativno jednostavnog upravljanja (pre svega jednostavnog uključenja), izuzetno malih gubitaka u stanju vođenja i veoma velike strujne opteretivosti i prenosa snage.

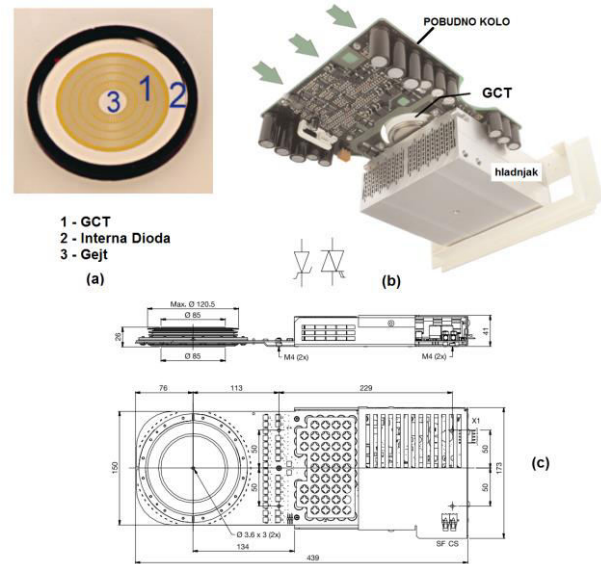
Standardno se proizvode PCT prečnika do 125mm i probojnim naponom do 8500V. Sa povećanjem potražnje za još većom snagom, kao što je slučaj sa ultra HVDC sistemima koji rade na 800kV i snagama prenosa reda veličine 10MW [13], razvijen je PCT većeg prečnika, odnosno 150mm, nominalne strujne opteretivosti do 4000A. Radi se o konkretnom tiristoru 5STP 45Y8500 proizvodnje Hitachi

ABB. Na Sl.21 su dati izgled, dimenzije i volt-amperka karakteristika u stanju vođenja za dati PCT. Za postizanje zahteva u pogledu napona vezuje se više ovakvih modula u jedan paket (popularno nazvan „stek“), od približno 100 redno povezanih modula, koji može izdržavati napone do 800kV.



Slika 21. Prikaz tiristora 8.5kV/4000A 5STP 45Y8500 proizvodnje Hitachi ABB i V-I karakteristike u stanju vođenja [14]

Jedna druga tiristorska struktura je zasnovana na prekidaču IGCT koji je evoluirao od tiristora sa isključenjem preko gejta, tzv. *Gate Turn-Off (GTO)* koji se sredinom 1990-ih nametnuo kao izbor za industrijske SN pretvarače i pretvarače u sistemima konverzije energije vetra. IGCT prekidač tip 5SH36L4521 4500V/3600A, proizvodnje Hitachi ABB, je prikazana na Sl.22. IGCT tehnologija primenjuje dva nivoa integracije: monolitna na pločici i hibridna sa perifernim GCT. U većini slučajeva anti-paralelna dioda je ugrađena monolitno, kao što prikazuje Sl.22(a) [15].



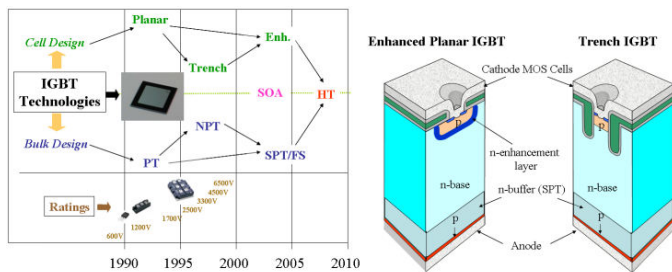
Slika 22. Prikaz IGCT visokonaponskog visokostrujnog prekidača; (a) interna struktura, (b) integrirani modul GCT sa hladnjakom i pobudnim kolom, (c) tehnički crtež sa dimenzijama

Ovo eliminiše diodni paket u kome su diode povezane jakim strujnim vezama. Integracija ove vrste postaje nepraktična samo pri najvećim strujama i GCT i dioda moraju

ostati odvojeni. Hibridnom integracijom postiže se bliža integracija GCT-a, pogonske jedinice i hladnjaka, kao što je prikazano na Sl.22(b). Sinergija mehaničke konstrukcije daje prednosti u pogledu smanjene veličine, veće stabilnosti i niže cene.

Zbog integracije sa nisko-induktivnim gejt jedinicama (ili tzv. drajverima), ovaj uređaj se uključuje i provodi slično kao tiristor, a isključuje se kao tranzistor (tzv. „teško prekidanje“). Nedavno predstavljena *High Power Tehnology* (HPT) za IGCT prekidače, daje proširenje njihove sigurne oblasti rada SOA (*Safe Operating Area*) do 50%, i koja pruža nove perspektive upravljanja, u poređenju sa standardnim uređajima. HPT je prvi put bio predstavljen kao IGCT sa maksimalnim naponom do 10 kV u [16].

IGBT prekidači su predodređeni da igraju još značajniju ulogu u budućim VSC topologijama za HVDC i FACTS sisteme. Trenutno, ali i u bliskoj budućnosti, se nudi familija IGBT prekidača za MW-ne aplikacije, tako optimizovanih da svakom novom poboljšanom generacijom omogućavaju jasan iskorak i napredak u pogledu snage. IGBT sa svojim inherentnim prednostima uključujući i niske zahteve za kontrolom (pobudom preko upravljačkog priključka-gejta) i sposobnošću podnošenja relativno velikog strujnog opterećenja, su usloveli da ovi prekidački elementi dobiju na značaju u protekle dve decenije. Što se tiče dostignuća u performansama, pregledni dijagram na Sl.23 daje evoluciju visokonaponskih i visokostrujnih IGBT prekidača [17].



Slika 23. Evolucija visokonaponskih visokostrujnih IGBT prekidača [10]

Punch-Through (PT), *Non-Punch-Through* (NPT) i *Soft-Punch-Through* (SPT) tipovi IGBT tehnologija [18], koji su istorijski startovali od relativno niskih struja i napona su evoluirali u elemente koji se široko koriste u visokonaponskim aplikacijama.

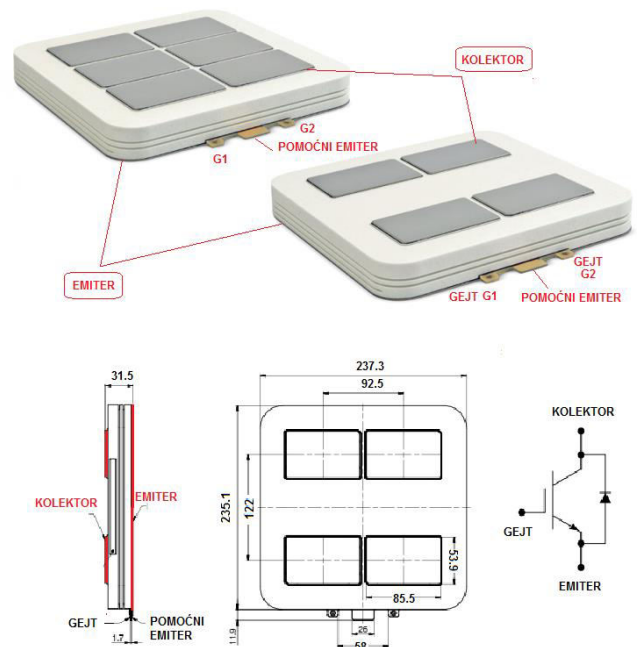
Danas, komercijalni IGBT stezni-paketi velike snage i izolovani moduli imaju karakteristične V/I vrednosti u rasponu od 1700 V/3600 A do 6500 V/750 A.

Da bi se poboljšala pouzdanost i smanjili troškovi u sistemima koji zahtevaju redundantnost i serijski povezane IGBT module, najčešće korišćeni su Hitachi Energy stezni paketi. U ovom slučaju se koristi koncept IGBT „*pres-pack*“ tehnologije koja: (1) omogućava lako mehaničko i električno serijsko povezivanje, (2) omogućava jednostavno dimenzionisanje naslaganih elemenata zahvaljujući visokoj toleranciji montažnog pritiska, (4) garantuje ujednačen pritisak na više elemenata, (5) obezbeđuje stabilno stanje u

slučaju kvara (kratkog spoja), (6) je podesna za režime dugotrajnijih kratkih spojeva. Iz ovih razloga IGBT moduli ovog tipa su veoma podesni za aplikacije kao što su HVDC, FACTS, VN prekidači i u režimima impulsnih snaga.

IGBT moduli tipa 5SNA1300K450300 proizvodnje Hitachi ABB, su za napone 4500 V, struje 1300 A i napon zasićenja u stanju provođenja struje između spojeva kolektora i emitera, od oko 3 V. Maksimalne performanse ovih IGBT paketa u ovom trenutku su 5200 V/3000 A/3 V za IGBT module 5SJA 3000L520300, takođe proizvodnje Hitachi ABB.

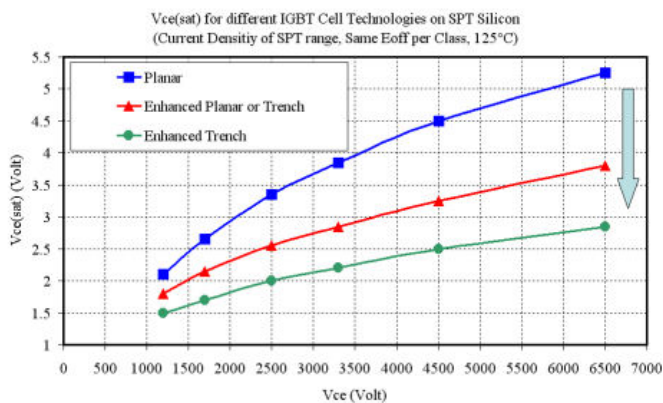
Najnoviji trendovi ciljaju niže gubitke zbog tanjih *n*-baznih regiona (SPT/FS) i plazmom ugrađenih slojeva za poboljšanje i/ili dizajn "trench" ćelija, kao što je prikazano na Sl.23. Ovo je praćeno širom oblasti sigurnog rada SOA i višom radnom temperaturom[10].



Slika 24. Prikaz visokonaponskog visokostrujnog IGBT modula sa naznačenim priključcima i dimenzijama

Slični razvojni naponi su ciljali na poboljšani dizajn inherentno ugrađene diode (koja je veoma bitna sa stanovišta prekidačkih performansi IGBT modula), koji je uticao na poboljšanje IGBT performansi.

Inherentna povratna dioda igra veoma značajnu ulogu u primeni tokom normalnog prekidanja i u uslovima udarnih struja. Trenutna IGBT platforma koja se koristi u mrežnim aplikacijama zasnovana je na poboljšanom planarnom dizajnu ćelije, tzv. *enhanced-planar cell design* (EP-IGBT), koji je omogućio rad za opseg podnosivih napona između priključaka kolektora i emitera V_{cc} od 1200 V do 6500 V i opseg napona zasićenja u stanju provođenja $V_{cc(sat)}$ od 1.5 V do 5 V, kao što je prikazano na dijagramu sa Sl.25.



Slika 25. Poređenje visokonaponskih IGBT tehnologija u zavisnosti napona zasićenja $V_{ce(sat)}$ od podnosivog napona kolektor-emiter V_{ce} [10]

ZAHVALNICA

Istraživanje u ovom radu je podržano od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija, Republike Srbije u okviru krovnog projekta pod Ugovorom br. 451-03-66/2024-03/200034.

LITERATURA

[1] A. Ekström, High Power Electronics in HVDC and SVC, The Royal Institute of Technology, Sweden, June 1990.

[2] R. Chokhawala, B. Danielsson and L. Angquist, "Power semiconductors in transmission and distribution applications," Proceedings of the 13th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs. IPSPD '01 (IEEE Cat. No.01CH37216), Osaka, Japan, 2001, pp. 3-10, doi: 10.1109/ISPSD.2001.934548.

[3] The key challenge in the HVDC technique was the development of reliable and economic valves which could convert high voltage alternating current into high-voltage direct current and vice versa, Grid Systems HVDC, ABB edition, 2004.
https://library.e.abb.com/public/93e7f5ea0e800b7cc1257ac3003f4955/HV_DC_50years.pdf

[4] J. Garte, T. Kaarsberg, J. Laitner, Electricity restructuring, innovation, and efficiency, A study conducted by the Northeast-Midwest Institute, 1991.

[5] Y. Rudenko and V. Yershevich "Is it possible and expedient to create a global energy network" International Journal of Global Energy Issues, Volume 3, No. 3, 1991

[6] Hector F. Latorre S., Modelling and Control of VSC-HVDC Transmissions, Doctoral Thesis Royal Institute of Technology, School of Electrical Engineering, Electric Power Systems, Stockholm, Sweden, 2011.

[7] R. Marquardt, "Modular Multilevel Converter: An universal concept for HVDC-Networks and extended DC-Bus-applications" (in Proc. Power Electronics Conference (IPEC), 2010, International, 2010, pages. 502-507).

[8] A. Lesnicar and R. Marquardt, "An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range" (in Proc. Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna, 2003, p. 6 pp. Vol.3).

[9] S. Allebrod, R. Hamerski, and R. Marquardt, "New transformerless, scalable Modular Multilevel Converters for HVDC-transmission" (in Proc. Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE, 2008, pages. 174-179)

[10] M. T. Rahimo, Ultra High Voltage Semiconductor Power Devices for Grid Applications, IEDM, December 2010, San Francisco, USA.

[11] R. Chokhawala, B. Danielson, and L. Anguish, "Power semiconductors in transmission and distribution applications", in Proc. ISPSD, Osaka, Japan, 2001, pp. 3-10.

[12] N. G. Hingorani, "Future role of power electronics in power systems," Proceedings of International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's: ISPSD '95, Yokohama, Japan, 1995, pp. 13-15, doi: 10.1109/ISPSD.1995.515001.

[13] Y. Yang *et al.*, "Effect of ± 800 kV Yun-Guang ultra HVDC transmission system on voltage profile in Guangdong Power Grid and corresponding enhancement measures", 2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), Gothenburg, Sweden, 2010, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISGTEUROPE.2010.5638937.

[14] Thyristor for > 10 Gigawatt Power Transmission, ABB, 2014., Power Electronics Europe, Issue 7 2014,
http://www.power-mag.com/pdf/feature_pdf/1418228601_ABB_Feature_0714_Layout_1.pdf

[15] H. Grüning, IGCT Technology — A Quantum Leap for High-power Converters,
https://library.e.abb.com/public/d627acaa2f9f8b24c1256f4100480fa0/P_T_IGCT.pdf

[16] I. Nistor, M. Schneinert, T. Wikström, M. Lusher, "An IGCT Chip set for 7.2kV (RMS) VSI Application", Proc. ISPSD'08, Orlando, pp 36-39, 2008.

[17] M. Rahimo, A. Kopta, S. Linder, "Novel Enhanced-Planar IGBT Technology Rated up to 6.5kV for Lower Losses and Higher SOA Capability", Proc. ISPSD'06, Napoli, pp 33-36, 2006.

[18] V. Crisafulli, IGBT Technologies and Applications Overview: How and When to Use an IGBT, Public information ON-Semiconductor, TND6235/D Rev. 2, March 2023.
<https://www.onsemi.com/pub/Collateral/TND6235-D.PDF>

ABSTRACT

The paper provides an overview of the actual status of the application of medium-voltage (LV) and high-voltage (HV) topologies of power converters and associated switching elements. The field of medium and high voltage power electronics has already become one of the key actors in the upcoming technical challenges imposed by the "smart grid", which enable maximum power throughput, almost instantaneous control of current and voltage in all parts of the transmission power system. Also, this area has a very important task to establish a reliable and flexible connection between individual parts of the transmission power system and consumption. Emphasis in the paper is placed on topologies of power converters related to systems of Flexible AC transmission (FACT) and High voltage DC transmission (HVDC). At the end, some practical examples of switching elements are presented and some unresolved problems, upcoming challenges and possible directions for further development in this complex area are highlighted.

OVERVIEW AND APPLICATION OF POWER CONVERTER TOPOLOGIES IN POWER TRANSMISSION SYSTEMS

Željko V. Despotović