

MOGUĆNOSTI POVEĆANJA PRIJENOSNE MOĆI EES-a KORIŠTENJEM KONVENCIONALNIH I FACTS NAPRAVA

Mr. sc. Nijaz Dizdarević, Zagreb

UDK 621.311.1:621.316.1
PREGLEDNI ČLANAK

U ovom je radu opisana problematika utjecaja FACTS naprava na povećanje prijenosne moći. Pri tome su korišteni statički i dinamički aspekti rješavanja problema stabilnosti napona te problema regulacije napona i kompenzacije jalove snage. Pregledom je obuhvaćen EES u uvjetima dužih prijelaznih razdoblja smanjene razine sigurnosti napona koji uključuje FACTS naprave različitog djelovanja. Opisane su mogućnosti primjene FACTS naprava s obzirom na granice opteretivosti prijenosnog sustava. Pored kratkog opisa i definicija naprava, navedeni su primjeri njihove praktične primjene. Uspoređena su svojstva i troškovi konvencionalnih i FACTS naprava.

Ključne riječi: prijenosna moć, kompenzacija jalove snage, regulacija napona, FACTS, stabilnost elektroenergetskog sustava.

1. UVODNA RAZMATRANJA

Problemi prijenosa električne energije i stabilnosti napona EES-a u posljednjem su desetljeću postali jedan od glavnih izazova pri planiranju i pogonu EES-a. Stabilnost napona [1-17], kao jedna od smjernica razvoja EES-a kako u svijetu tako i u nas, motivirana je pojavom uvjeta prijenosa različitih iznosa snage između različitih sustava ili dijelova istog sustava. Pri tome se očekuje da je elektroenergetska mreža sposobna prenijeti najveći mogući iznos snage pri različitim ograničenjima proizvodnih i prijenosnih elemenata.

Jedan od osnovnih uzroka povećanog zanimanja svjetske znanstvene i stručne javnosti za probleme ograničenog prijenosa električne energije nalazi se u opasnom približavanju mnogih sustava granicama stabilnosti zbog povećanog opterećenja sustava koje nije praćeno odgovarajućim povećanjem prijenosne moći. Također, u uvjetima malih opterećenja prijenosnih elemenata, prvenstveno zbog prevladavajućih poprečnih kapaciteta vodova, moguća je pojava povišenih iznosa napona koji u konačnici mogu dovesti do ozbiljnih oštećenja pojedinih elemenata rasklopnih postrojenja.

Dakle, problem prijenosa u elektroenergetskim sustavima u kojima se očekuju različite snage prijenosa predstavlja ozbiljan inženjerski izazov u fazi projektiranja sustava, ali i operatorski pri vođenju sustava. Nedovoljan iznos jalove snage kompenzacije može uzrokovati značajne probleme pa i prekide opskrbe električnom energijom. Zbog toga se velika pozornost posvećuje razumijevanju problema ograničenosti prijenosne moći u uvjetima povećane nesigurnosti na-

pona te projektiranju različitih načina njegova izbjegavanja, kako u normalnim uvjetima tako i u uvjetima poremećenog pogona.

Budući da je EES Hrvatske značajno oštećen ratnim razaranjima uz potpuno transformiranu strukturu sustava prema longitudinalnoj od koje se očekuje nekoliko različitih smjerova prijenosa (npr. prijenos snage iz južnog dijela sustava s dominantnim hidroenergetskim izvorima u sjeverni dio s kombiniranim hidro i termoenergetskim izvorima korištenjem dugih prijenosnih vodova, zatim prijenos snage iz središnjeg dijela sustava prema istočnom dijelu Slavonije, te prijenos snage između sustava Hrvatske i Mađarske), postoji osnovana bojazan i određena očekivanja naglašenije pojave navedenog problema i u prijenosnoj mreži Hrvatske elektroprivrede. Osnovni uzrok tim očekivanjima pronalazi se u činjenici da je u sustavu značajno smanjena razina sigurnosti pogona zbog mnogih prenamjena vodova i ispada postrojenja izvan provotnog kriterija planiranja. Sustav može postati ozljeđiv i pri očekivanom povećanju industrijskih opterećenja. Dakle, osim teorijskih izazova postoje i praktični razlozi razmatranja utjecaja naponskih prilika na mogućnosti prijenosa snage sa stajališta planiranja i pogona EES-a.

FACTS (eng. Flexible AC Transmission System) naprave, zasnovane na energetskej elektronici, pored teorijskog razmatranja doživljavaju posljednjih godina i svoju praktičnu primjenu [18-24]. Putem doprinosa CIGRÉ Studijskog komiteta 14, namjera je informirati stručnu javnost u kojoj mjeri FACTS naprave doprinose povećanju prijenosne moći sa statičkog i dinamičkog aspekta rješavanjem problema stabilnosti

napona te problema regulacije napona i kompenzacije jalove snage. Ovim pregledom obuhvaćen je EES u uvjetima dužih prijelaznih razdoblja smanjene razine sigurnosti napona koji uključuje FACTS naprave različitog djelovanja.

2. MOGUĆNOSTI PRIMJENE FACTS NAPRAVA

Većina današnjih elektroenergetskih sustava međusobno je izrazito povezana prvenstveno iz ekonomskih razloga, u svrhu smanjenja troškova i povećanja pouzdanosti dobave električne energije. Prijenosne veze omogućavaju korištenje raznolikosti opterećenja, raspoloživosti izvora i cijene goriva kako bi dobavljale električnu energiju potrošačima s minimalnim troškovima uz zahtijevanu razinu pouzdanosti.

U posljednje doba, prijenosni dio EES-a se sve češće tretira kao alternativa novim energetske izvora. Naime, u uvjetima smanjene prijenosne moći postavljaju se povećani zahtjevi za građenjem novih izvora. Time se poznavanje optimalno uravnotežene izgrađenosti sektora proizvodnje i prijenosa čini vrlo teškim. Osobito ukoliko u fazi planiranja nisu korištene metode uključivanja prijenosnog sustava u scenarij planiranja ukupnog proizvodno-prijenosnog sustava. Troškovi izgradnje prijenosnog voda i gubici prijenosa, pored administrativnih poteškoća u pribavljanju svih potrebnih dozvola za građenje, često ograničavaju ulaganje u izgradnju novih prijenosnih veza čime se uvelike ograničava prijenosna moć. U dereguliranom okruženju, učinkovitost elektroenergetske mreže od vitalnog je značaja za uspostavu tržišnog nadmetanja zbog zahtjeva za visokim stupnjem pouzdanosti.

Razmatranjem trenutnog stanja razvijenosti i trendova primjene energetske elektronike (uz očekivano smanjenje troškova, veličine izgradnje i gubitaka) prepoznaje se zapravo tek početna faza korištenja nove tehnologije. Elektroenergetski sustavi današnjice velikom su većinom mehanički upravljivi. Bez obzira na široko korištenje mikroelektronike, računala i komunikacijskih sredstava velikih brzina, ipak kada se upravljački signali šalju u energetske krugove te kada je potrebno poduzeti krajnje upravljačko djelovanje razina je mehanička. Na toj razini postoji vrlo malo mogućnosti brzog upravljanja. Drugi problem s korištenjem mehaničkih naprava odnosi se na nemogućnost učestalog upravljačkog djelovanja. Naime, mehaničke naprave tendiraju bržem trošenju u usporedbi sa statičkim napravama energetske elektronike. Sa stajališta dinamičkog i stacionarnog pogona takav sustav je izrazito neupravljiv.

Mogućnosti primjene naprava zasnovanih na energetskej elektronici vrlo su raznolike u sektorima proizvodnje, distribucije i prijenosa.

Sektor proizvodnje. U sektoru proizvodnje, potencijalna primjena energetske elektronike najizraženija je kod obnovljivih izvora energije. Fotonaponski izvori i go-

rive stanice zahtijevaju pretvorbu iz istosmjernog u izmjenični sustav. Proizvodnja iz izvora s promjenjivom brzinom vrtnje karakteristična je za vjetroelektrane i male hidroelektrane. Generatori u tim elektranama zahtijevaju pretvorbu promjenjive izmjenične frekvencije na razinu konstantne frekvencije sustava. U navedenim primjenama energetske elektronike, raspon dimenzioniranja pretvarača kreće se između nekoliko kW i nekoliko MW. Brzi razvoj tehnologije energetske elektronike zasigurno će utjecati i na dobavu električne energije malim izoliranim potrošačima, gdje dovođenje standardnog sustava ne bi bilo ekonomski isplativo. U termoelektranama, značajan dio potrošnje moguće je uštedjeti korištenjem pumpi i kompresora koje imaju pogon s promjenjivom brzinom vrtnje. U idućem razdoblju, očekivanja su također usmjerena prema uskladištenju električne energije korištenjem kondenzatora, baterija i supravodljivih magneta. Njihova primjena zahtijeva pretvorbu tipa ac/dc/ac u rasponu snage od nekoliko kW do nekoliko desetaka MW.

Sektor distribucije. U sektoru distribucije, mogućnost primjene rješenja po mjeri potrošača (eng. Custom Power Solutions) čini se najprihvatljivijom varijantom. Dobava električne energije industrijskim i ostalim velikim potrošačima time bi se oslobodila od problema poput smanjene pouzdanosti opskrbe zbog smanjenog napona, distorziranog napona ili prenapona. Danas je vrlo dobro poznato da smanjenje napona u iznosu od 15-20% i trajanju dužem od nekoliko perioda (zbog atmosferskog pražnjenja ili isklapanja/uklapanja elemenata u prijenosnom i distribucijskom sustavu) uzrokuje značajne gubitke u visoko automatiziranoj industriji. Koncept rješenja po mjeri potrošača uključuje primjenu naprava zasnovanih na energetskej elektronici čija se nazivna snaga kreće u rasponu od nekoliko desetaka kW do nekoliko desetaka MW. Na strani krajnjih korisnika sa širokim rasponom potreba, energetska elektronika predstavlja područje brzog razvitka već 20-ak godina. Pretvorba u impulse i elektromagnetske valove omogućila je pojavu suvremenih računala i komunikacija. Pretvorba u mikrovalove omogućila je pojavu mikrovalnih pećnica, industrijskih procesa i radara. Učinkovita rasvjeta, laseri, vizualna pomagala, roboti, medicinska oprema i naravno pogoni s promjenjivom brzinom vrtnje samo su neki od mnogih primjera. Pored rješenja po mjeri potrošača, postoji i cijelo područje tehnologije poboljšanja dobave električne energije koju koriste krajnji potrošači. To je područje poznato pod nazivom kvaliteta dobave (eng. Power Quality). Sustavi besprekidnog napajanja i regulacije napona predstavljaju područja primjene energetske elektronike s najbržim rastom. Raspon snage kreće se od nekoliko W do nekoliko desetaka MW.

Sektor prijenosa. U sektoru prijenosa, primjena energetske elektronike izrazita je u tehnici visoko naponskog istosmjernog prijenosa (eng. HVDC, High

Voltage Direct Current) te kod FACTS naprava. HVDC je danas u stanju zrelog tehnološkog razvitka i često isplativiji način povezivanja nekih EES-a, osobito onih koji su locirani u različitim regijama odvojenim velikim udaljenostima (iznad 50 km za podmorske kabele i 1000 km za nadzemne vodove). Također, primjena je moguća i kod povezivanja sustava različite frekvencije ili sustava iste frekvencije, ali različitim načina njezine regulacije. HVDC na jednom kraju izvodi pretvorbu izmjeničnog sustava u istosmjerni, a na drugom kraju pretvorbu iz istosmjernog u izmjenični sustav. Općenito, snage potrebne pri spomenutim pretvorbama kreću se u rasponu od nekoliko stotina MW do nekoliko tisuća MW. U svijetu danas postoji više od 50 završenih projekata. Njihova ukupna prijenosna moć iznosi približno 50 000 MW (100 000 MW snage pretvorbe) i to na naponskim razinama do ± 600 kV. Za udaljene i relativno male potrošače od nekoliko MW, udaljenost pri kojoj je HVDC isplativiji od izmjeničnog prijenosa može biti samo cca 100 km. FACTS naprave imaju ulogu poboljšanja upravljivosti prijenosnom snagom i povećanja prijenosne moći u prijenosnom sustavu. FACTS naprave uključuju pretvorbu korištenjem energetske elektronike čija se snaga kreće u rasponu od nekoliko desetaka MW do nekoliko stotina MW.

3. GRANICE OPTERETIVOSTI UNUTAR PRIJENOSNOG SUSTAVA

Kako snage prijenosa rastu tako EES postaje sve složeniji za upravljanje. Time se uvelike može smanjiti razina sigurnosti pri većim ispadima. Pri tome se mogu pojaviti veliki tokovi snage s neodgovarajućim stupnjem upravljivosti, preveliki iznosi jalove snage u različitim dijelovima sustava i velika elektromehanička njihanja između različitih dijelova sustava. Tada je potpuno korištenje prijenosnih veza značajno umanjeno. Mnogi prijenosni sektori suočeni su s ograničenjima jednog ili više parametara mreže uz već poznatu neupravljivost tokovima snage prema htijenjima dispečera.

Kod izmjeničnih sustava s beznačajnom mogućnosti uskladištenja električne energije, proizvodnja i opterećenje moraju biti konstantno uravnoteženi. Jednim manjim dijelom, EES može iskazati osobine samo-regulacije. Ako je proizvodnja manja od opterećenja, napon i frekvencija se smanjuju čime se i opterećenje smanjuje na razinu proizvodnje umanjenu za gubitke prijenosa. Ipak, samo-regulacija se javlja u margini od nekoliko postotaka. Ako se podigne iznos napona injektiranjem jalove snage, opterećenje će porasti čime se frekvencija nadalje smanjuje te se sustav kreće prema slomu frekvencije. Međutim, ako ne postoji dovoljna potpora jalovom snagom, sustav može ići i prema slomu napona. U uvjetima odgovarajuće raspoložive proizvodnje, djelatna snaga teče iz područja viška u područja manjka putem paralelnih veza koje su često vrlo visokog i visokog napona. Često se takav

prijenos odvija na velikim udaljenostima, zapravo preko samo nekoliko značajnih veza i puno više veza manjeg značenja.

Uz pretpostavku da vlasništvo nije upitno, u korištenju sektora prijenosa za cilj se postavlja maksimiziranje moguće opteretivosti prijenosnog sustava u uvjetima predvidivih ispada elemenata mreže. Svakako je tada nužno znati čime je prijenosna moć ograničena te što je moguće učiniti ne bi li se uočena ograničenja ublažila.

U osnovi, tri su vrste ograničenja:

- termička ograničenja,
- dielektrička ograničenja i
- ograničenja stabilnosti.

Termička ograničenja. Termička ograničenja nadzemnih vodova ovisna su o temperaturi okoliša, vjetrovitosti, stanju vodiča, čistini ozemlja i prethodnim opterećenjima. Moguće su razlike dvostrukog iznosa u ovisnosti o promjenjivosti okoliša i prethodnim stanjima opterećenja. Nominalno opterećenje voda uobičajeno se određuje na konzervativnoj osnovi predviđanjem statistički najtežeg slučaja stanja okoliša. Marginu dodatnog opterećenja moguće je koristiti nadzorom u realnom vremenu. Osim toga, opteretivost je moguće povećati zamjenom postojećih vodiča s onima koji imaju veću nazivnu opteretivost te uvođenjem dvostrukih umjesto jednostrukih vodova. U slučaju povećanja termičke opteretivosti postavljaju se pitanja njezine iskoristivosti. Naime, upitno je hoće li dodatna snaga zaista teći i može li biti upravljiva, odnosno jesu li naponski uvjeti prihvatljivi u slučaju iznenadnog smanjenja opterećenja. FACTS tehnologija može biti od velike pomoći u učinkovitom korištenju novostvorene prijenosne moći.

Dielektrička ograničenja. Sa stajališta izolacije, mnogi su vodovi projektirani vrlo konzervativno. Pri definiranom nazivnom naponu, često je moguće povećati uvjete normalnog pogona i za 10% njegovog iznosa. Pozornost je potrebna pri osiguranju zadovoljenosti uvjeta ograničenja koje postavlja pojava dinamičkih prenapona. Suvremeni odvodnici prenapona (bez raspora), izolatori s unutarnjim odvodnicima (bez raspora) i tiristorski upravljivi potiskivači prenapona mogu u značajnoj mjeri omogućiti povećanje iskoristivosti voda ili rasklopnog postrojenja. FACTS tehnologija može biti korištena radi osiguranja zadovoljenosti prihvatljivih uvjeta pojave prenapona i velikih tokova snage.

Ograničenja stabilnosti. Značajan je broj problema stabilnosti koji ograničavaju prijenosnu moć, kako sa stajališta kuta rotora sinkronih generatora tako i sa stajališta iznosa napona u čvorištima EES-a:

- prijelazna stabilnost,
- dinamička stabilnost,
- stabilnost stacionarnog stanja,
- subsinkrona stabilnost,

- slom frekvencije i
- slom napona.

FACTS tehnologija zasigurno može biti korištena u prevladavanju navedenih problema stabilnosti, nakon čega kao krajnja ograničenja preostaju ona termičke i dielektričke prirode.

Odnedavna, sve se veći zahtjevi postavljaju na prijenosnu mrežu i za očekivati je da će se ti zahtjevi nastaviti povećavati zbog sve većeg broja malih proizvođača i povećanog tržišnog natjecanja između elektroprivreda. Štoviše, povećavaju se administrativni problemi pri dobivanju svih potrebnih dozvola za izgradnju novih prijenosnih objekata. Povećani zahtjevi, nepostojanje ili nepridržavanje dugoročnih planova te omogućavanje otvorenog pristupa prijenosnom sustavu svih proizvodnih kompanija i potrošača uzrokom su stvaranja tendencije smanjenja razine sigurnosti pogona i kvalitete dobave električne energije. FACTS tehnologija je značajna, ali ne i jedina mogućnost rješavanja problema korištenja prijenosnog sustava i povećanja pouzdanosti mreže. Nužno je naglasiti da za mnoge potrebe povećanja prijenosne moći nije moguće izbjeći gradnju novih vodova ili nadogradnju postojećih.

Najzanimljivija osobina FACTS tehnologije u sektoru prijenosa svakako je upravljanje tokovima snage i poboljšanje iskoristivosti kako postojećih tako i novih vodova. Mogućnost upravljanja strujom voda uz prihvatljive troškove rezultira s velikim povećanjem prijenosne moći postojećih vodova (s dostatno dimenzioniranim vodičima). FACTS tehnologija nije samo jedna naprava koja rješava postavljani problem, već skup naprava koje mogu biti primijenjene individualno ili u koordinaciji s drugima radi upravljanja s jednim ili više parametara sustava. U tom svjetlu, upravljanje korištenjem mehaničkih naprava nije prihvatljivo. Korištenjem svojstva fleksibilnosti FACTS naprava, moguće je postići opterećenje voda koje je vrlo blizu termičkom ograničenju. Upravljanje je moguće zahvaljujući sposobnosti FACTS naprava da nadziru veličine koje su iznimno značajne u prijenosnom sustavu; serijska impedancija, poprečna impedancija, struja, napon, fazni kut te stupanj prigušenja njihanja na različitim frekvencijama ispod nazivne.

Okosnicu primjene FACTS naprava čini izvor napona koji se injektira u serijsku ili/i poprečnu granu. Promjenom injektiranog napona po iznosu i kutu u odnosu prema naponu čvorišta incidentnog voda, moguće je istodobno utjecati na tok djelatne i jalove snage.

S obzirom na injektirani izvor napona, značajno je uočiti nekoliko elementarnih stavova koji se koriste u upravljanju tokovima snage:

- upravljanje serijskom impedancijom voda omogućava provođenje učinkovitog upravljanja tokom struje,
- u relativno čestom slučaju kada kut prijenosa nije velikog iznosa, upravljanje serijskom impedancijom

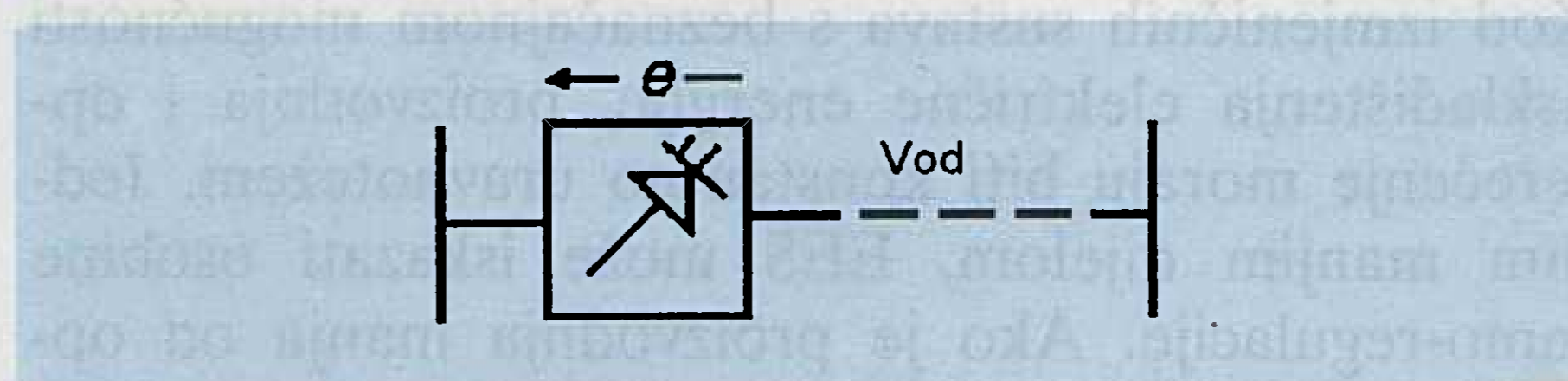
voda ili kutem prijenosa značajno utječe na upravljanje tokom djelatne snage,

- upravljanje kutem prijenosa omogućava upravljanje tokom struje i tokom djelatne snage kada kut prijenosa nije velik,
- injektiranjem napona u serijskoj grani koji je u okomici, obzirom na tok struje, moguće je mijenjati iznos toka struje kroz vod (budući da tok struje zaostaje za naponom za 90° , injektiranjem jalove snage u serijskoj grani upravlja se strujom voda i djelatnom snagom kada kut prijenosa nije velik),
- injektiranjem napona u serijskoj grani, uz bilo koji iznos kuta tog napona, obzirom na napon čvorišta, moguće je upravljati iznosom i kutem struje voda (injektiranjem fazora napona promjenjivog po kutu istodobno se upravlja tokom djelatne i jalove snage),
- s obzirom da su iznosi jediničnih vrijednosti impedancija voda najčešće samo mali dio linijskog napona, nazivna snaga serijske naprave često je samo mali dio ukupne prijenosne moći voda,
- kada kut prijenosa nije velik, upravljanjem iznosom jednog ili više napona čvorišta moguće je učinkovito upravljati tokom jalove snage u interkonekciji,
- istodobnim kombiniranim upravljanjem serijskom impedancijom voda pomoću serijske naprave i reguliranjem napona pomoću poprečne naprave, moguće je učinkovito upravljati tokovima djelatne i jalove snage između dva sustava.

Općenito uzevši, FACTS naprave je prema vrsti priključka na prijenosni sustav moguće podijeliti na:

- serijske naprave,
- poprečne naprave,
- kombinirane serijsko-serijske naprave i
- kombinirane serijsko-poprečne naprave.

Serijske naprave. Serijska naprava se izvodi u obliku promjenjive impedancije (kondenzator ili prigušnica) ili promjenjivog izvora napona zasnovanog na energetskej elektronici. U osnovi sve serijske naprave injektiraju napon u seriji s vodom (slika 1).

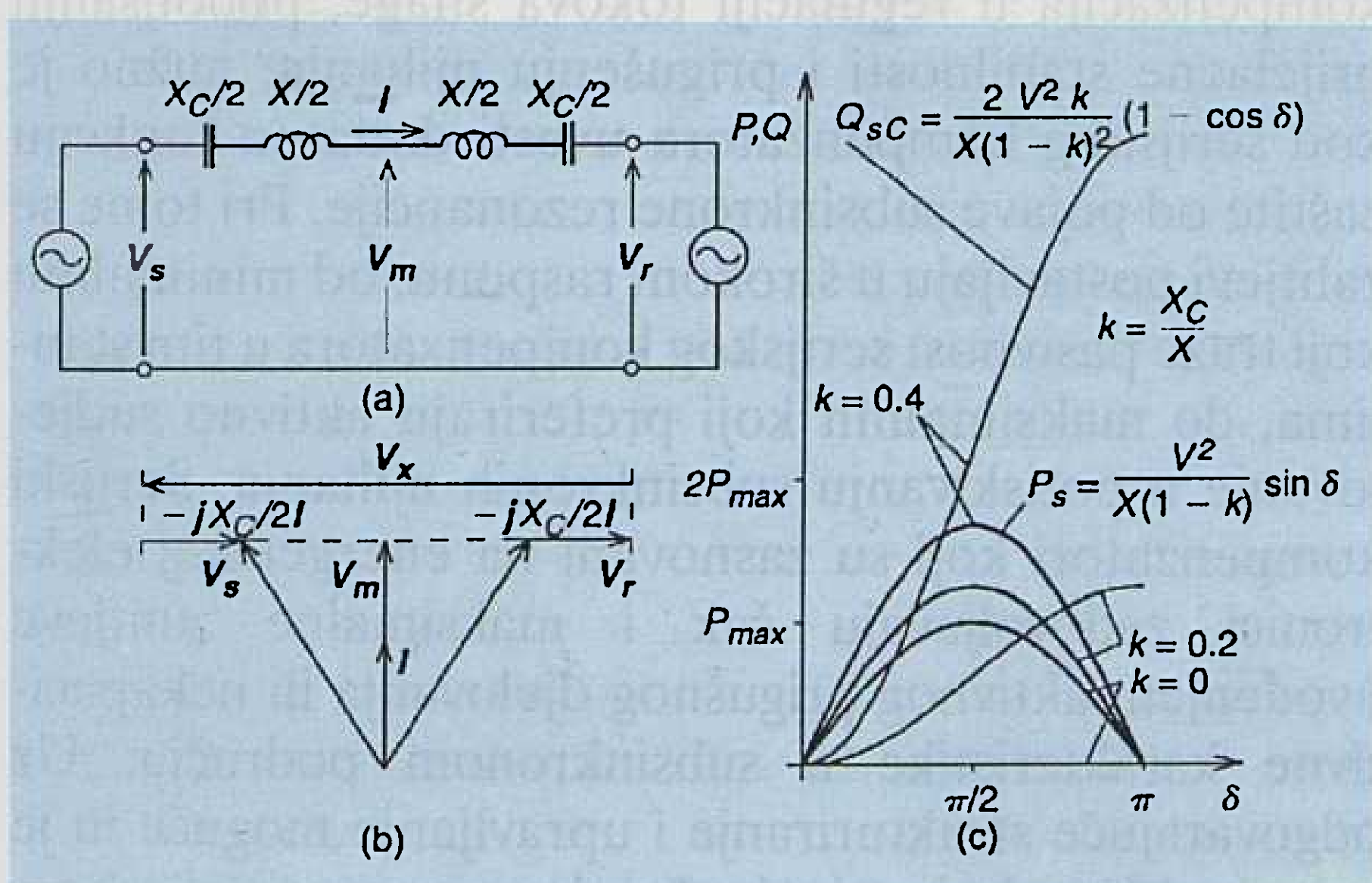


Slika 1. Serijska naprava

Čak i promjenjiva impedancija pomnožena sa strujom predstavlja jedan oblik injektiranja serijskog napona u vodu. Održavajući napon fazno okomitim obzirom na struju koja teče vodom, serijska naprava proizvodi ili troši jalovu snagu promjenjivog iznosa. U slučaju odstupanja faznog položaja od okomitog pojavljuje se i djelatna snaga. Pri definiranim iznosima napona čvorišta, prijenosnu snagu određuje serijska impedancija voda i razlika kuteva napona čvorišta između kojih teče

snaga. Serijska kapacitivna kompenzacija u pogonu je već nekoliko desetljeća. Naime, već je odavno poznato kako je snaga izmjeničnog prijenosa na velikim udaljenostima ograničena prvenstveno serijskom induktivnom reaktancijom voda. Primjenom serijskih FACTS naprava moguće je uvesti promjenjivu serijsku kompenzaciju putem učinkovitog upravljanja tokom snage i poboljšanja stabilnosti. Upravljiva serijska kompenzacija predstavlja osnovu razvoja FACTS tehnologije. Primjenjuje se radi postizanja pune iskoristivosti prijenosnog sustava putem upravljanja tokovima snage u vodovima, uklanjanja petljastih tokova snage te minimiziranja utjecaja poremećaja korištenjem brzih upravljačkih krugova. Na taj se način ublažavaju zahtjevi stabilnosti za tradicionalnim sigurnosnim marginama pogona.

Osnovna ideja vodilja serijske kapacitivne kompenzacije jest smanjenje ukupne serijske reaktancije između dvije točke prijenosnog sustava. U jednostavnom dvostrojnom sustavu (slika 2.a), pomoću serijskog kondenzatora kompenzira se induktivna reaktancija voda prema standardnom vektorskom dijagramu (slika 2.b). Prema očekivanju, djelatna snaga prijenosa izrazito se povećava s povećanjem stupnja serijske kompenzacije k (slika 2.c). Slično, jalova snaga koju dobavlja serijski kondenzator također se izrazito povećava s povećanjem stupnja kompenzacije te se mijenja u ovisnosti o kutu δ na sličan način kao i jalova snaga voda.

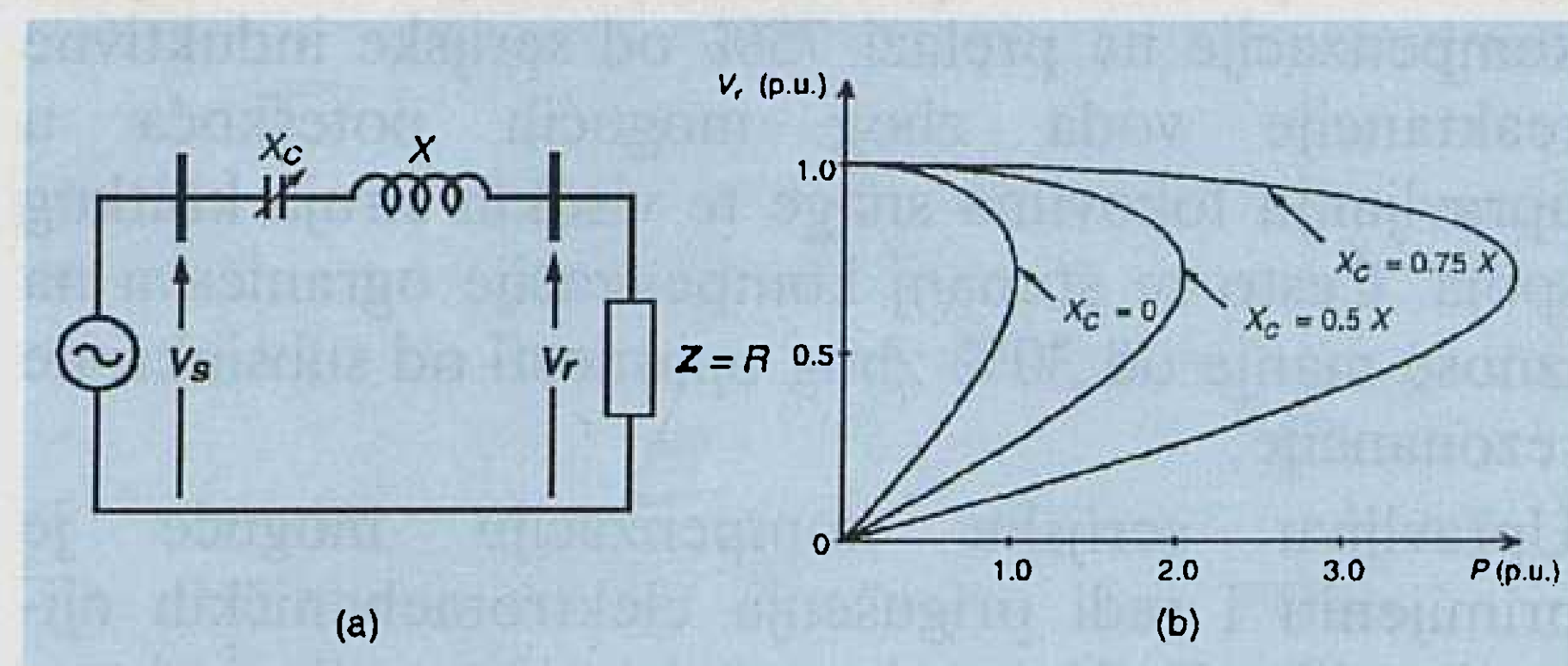


Slika 2. Kompencija pomoću serijske naprave; (a) dvostrojni sustav, (b) vektorski dijagram i (c) ovisnost djelatne i jalove snage o kutu i stupnju kompenzacije

Nakon predočavanja elementarnih jednadžbi, nužno je ukazati i na dualnost fizikalnog objašnjenja serijske kompenzacije, osobito stoga jer omogućava primjenu FACTS naprava. Prema konvencionalnom objašnjenju, reaktancija serijskog kondenzatora poništava dio serijske induktivne reaktancije voda čime se smanjuje ukupna efektivna serijska reaktancija kao da je vod fizički skraćen. Prema drugom objašnjenju, da bi se povećala struja kroz serijsku induktivnu reaktanciju voda (ujedno i snaga), nužno je povećati napon na toj reaktanciji. Povećanje napona stvara se priključenjem serijskog elementa čija impedancija (uz struju) proizvodi napon suprotnog smjera naponu serijske induk-

tivne reaktancije voda. Temeljem drugog objašnjenja slijedi da fizički oblik serijskog elementa nije značajan sve dok element rezultira potrebnim kompenzacijskim naponom. Stoga element može biti u obliku elektroničkog izvora izmjeničnog napona (FACTS naprava) koji izravno injektira potrebni napon kompenzacije u seriji s vodom.

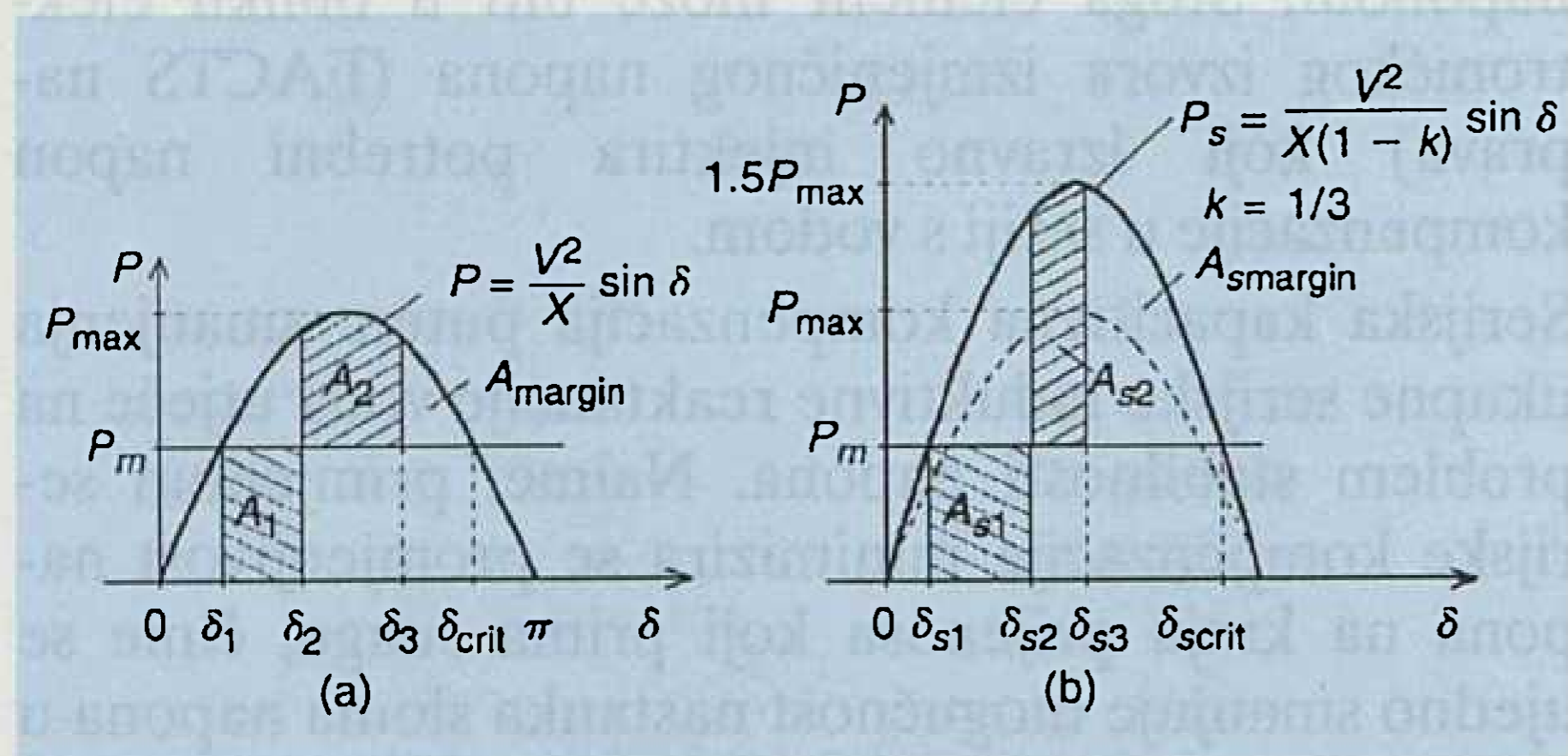
Serijska kapacitivna kompenzacija putem smanjenja ukupne serijske induktivne reaktancije voda utječe na problem stabilnosti napona. Naime, primjenom serijske kompenzacije minimizira se promjenjivost napona na kraju prijenosa koji prima snagu, čime se ujedno smanjuje mogućnost nastanka sloma napona u radijalnom prijenosnom sustavu (slika 3.a). Koljenaste točke predočenih V - P krivulja (slika 3.b) ukazuju na najveće iznose snage koje je moguće prenijeti. Očito se primjenom serijske kompenzacije značajno povećava najveća snaga prijenosa, čime se utječe i na ograničenje postavljeno pojavom problema stabilnosti napona.



Slika 3. Utjecaj serijske kompenzacije na stabilnost napona; (a) radijalni sustav i (b) V - P krivulja

S obzirom da primjena serijske kompenzacije uvelike omogućava upravljanje tokovima snage u vodu, među FACTS napravama postoje i one naprave koje su iskoristive tijekom pojava vezanih uz prijelaznu stabilnost. Ako je u jednostavnom dvostrojnom sustavu u slučajevima sa i bez serijske kompenzacije snaga prijenosa određena iznosom P_m (slika 4), isti poremećaj uzrokuje različite prijelazne pojave. Prema kriteriju jednakih površina, snazi prijenosa P_m odgovaraju kutevi δ_1 (slika 4.a, bez kompenzacije) i δ_{s1} (slika 4.b, s kompenzacijom). Tijekom poremećaja, električna snaga prijenosa postaje jednaka nuli dok mehanička snaga generatora P_m ostaje konstantna. Stoga se generator ubrzava od vrijednosti kuteva δ_1 i δ_{s1} (ovisno o primjeni kompenzacije) do vrijednosti δ_2 i δ_{s2} , kada dolazi do prestanka trajanja kvara. Energije ubrzavanja predstavljene su površinama A_1 i A_{s1} . Nakon prestanka kvara, električna snaga prijenosa nadvisuje mehaničku ulaznu snagu i generator se počinje usporavati. Ipak, akumulirana kinetička energija i nadalje se povećava sve do uspostavljanja ravnoteže između energije ubrzavanja i usporavanja (površine A_1 i A_{s1} , te A_2 i A_{s2}). Površine između P - δ krivulje i crte konstantne mehaničke snage P_m u rasponu iznosa kuta od δ_3 do δ_{crit} te od δ_{s3} do δ_{scrit} , određuju margine prijelazne stabilnosti predočene površinama A_{margin} i $A_{smargin}$. Usporedbom nji-

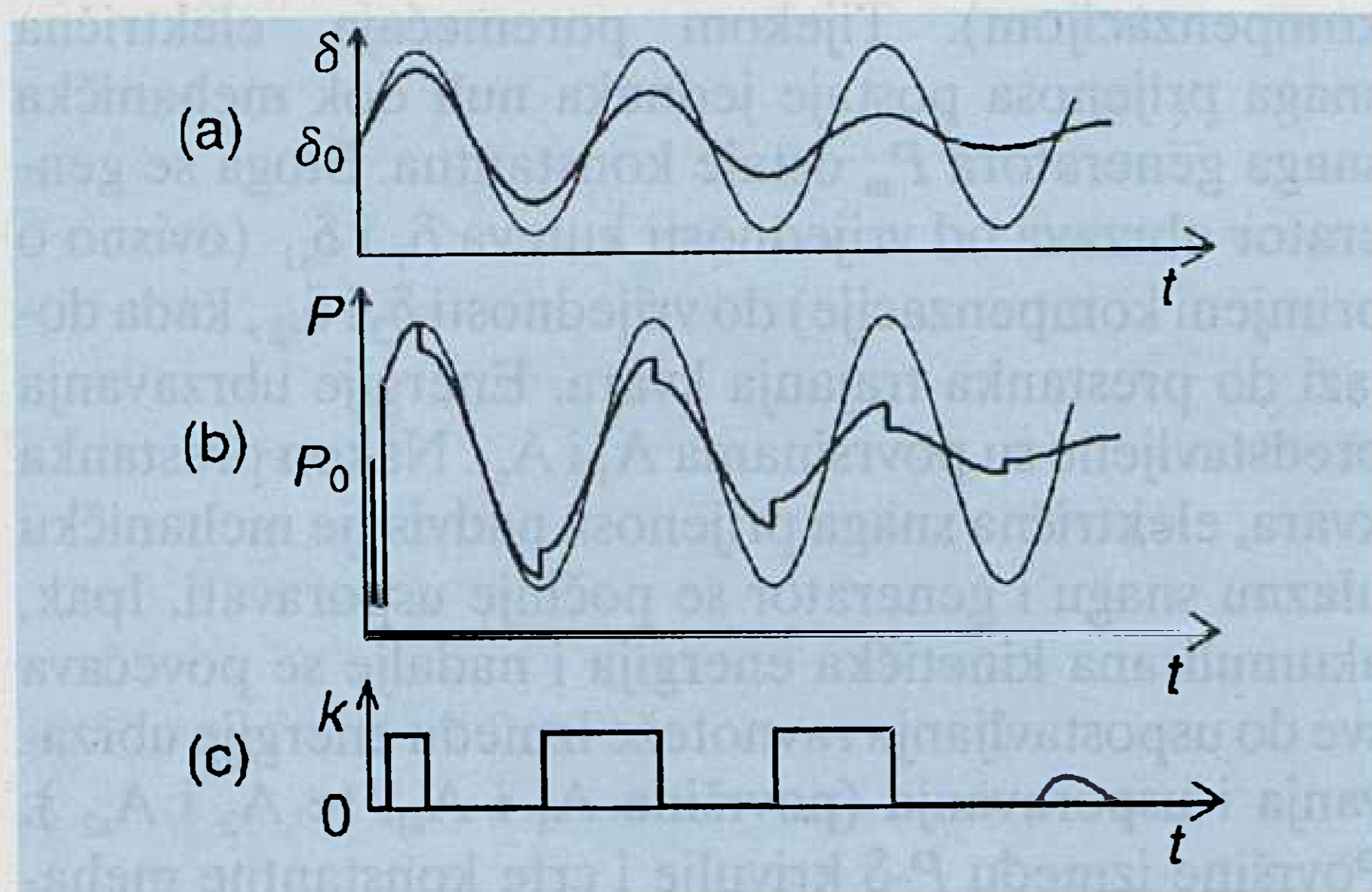
hovitih veličina zaključuje se kako je u slučaju primjene serijske kompenzacije margina prijelazne stabilnosti znatno veća.



Slika 4. Kriterij jednakih površina u primjeni serijske kompenzacije; (a) bez primjene i (b) s primjenom serijske kompenzacije

Teorijski, povećanje margine može biti neograničeno ako se serijska induktivna reaktancija voda u potpunosti kompenzira. U praktičnim slučajevima, stupanj kompenzacije ne prelazi 75% od serijske induktivne reaktancije voda zbog mogućih poteškoća u upravljanju tokovima snage te visokih struja kratkog spoja. Često se stupanj kompenzacije ograničava na iznose manje od 30% zbog opasnosti od subsinkrone rezonancije.

Upravljivu serijsku kompenzaciju moguće je primijeniti i radi prigušenja elektromehaničkih njihanja (slika 5). U tom je slučaju nužno mijenjati stupanj kompenzacije velikom brzinom, kako bi se utjecalo na ubrzavajuće i usporavajuće njihanje generatora u poremećaju. Ako se generator za vrijeme njihanja ubrzava i povećava kut δ ($d\delta/dt > 0$), električnu snagu prijenosa potrebno je povećati kako bi se kompenzirao višak mehaničke ulazne snage. U obrnutom slučaju, ako se generator usporava i smanjuje kut δ ($d\delta/dt < 0$), električnu snagu potrebno je smanjiti kako bi se kompenzirao manjak mehaničke ulazne snage. Zahtijevane promjene kuta (a), električne snage prijenosa (b) i stupnja serijske kompenzacije (c) predočene su na slici 5 za jedan hipotetski slučaj. Uočava se da je

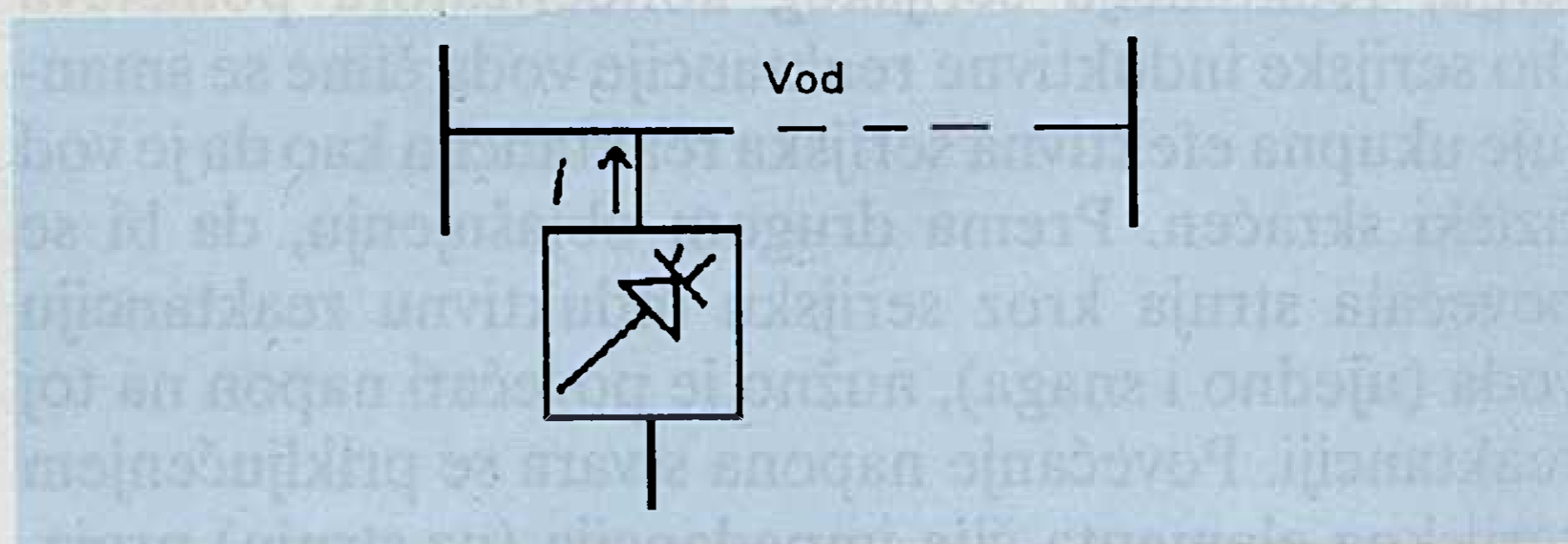


Slika 5. Prigušenje njihanja primjenom serijske kompenzacije; (a) kut generatora, (b) djelatna snaga prijenosa i (c) stupanj kompenzacije

stupanj kompenzacije maksimalnog iznosa kada je $d\delta/dt > 0$, a jednak nuli kada je $d\delta/dt < 0$. Pri maksimalnom iznosu stupnja kompenzacije, efektivna reaktancija voda je minimalna. Pri nultom iznosu stupnja kompenzacije, efektivna reaktancija voda je maksimalna. U primjeru je predočena skokovita promjena stupnja kompenzacije sa samo dvije njegove vrijednosti (maksimalnom i minimalnom), što predstavlja vrlo učinkovit pristup u prigušenju velikih njihanja. U postupku prigušenja malih njihanja, osobito s velikim serijskim kompenzatorom, kontinuirano upravljanje stupnjem kompenzacije može biti bolje rješenje s obzirom na kut ili snagu.

Primjena serijske kapacitivne kompenzacije može, u nekim slučajevima, izazvati pojavu torzijskog napanja na frekvencijama manjim od temeljne frekvencije sustava, odnosno subsinkronu rezonanciju. Teorijska su istraživanja pokazala da međudjelovanje serijski kapacitivno kompenziranog voda i mehaničkog sustava turbine i generatora može uzrokovati pojavu negativnog prigušenja. Kao posljedica javljaju se električne i mehaničke (torzijske) oscilacije. Veliki generatori s višestupanjskom parnom turbinom, koji imaju višestruke torzijske modove s frekvencijama ispod temeljne, najugroženiji su u primjeni serijski kapacitivno kompenziranih vodova upravo zbog pojave subsinkrone rezonancije. Kako bi se u potpunosti iskoristile mogućnosti koje pruža upravljiva serijska kapacitivna kompenzacija u regulaciji tokova snage, poboljšanju prijelazne stabilnosti i prigušenju njihanja, nužno je kod serijskog kompenzatora uvesti dodatnu funkciju zaštite od pojave subsinkrone rezonancije. Pri tome se zahtjevi postavljaju u širokom rasponu; od minimalnih koji traže pasivnost serijskog kompenzatora u tim stanjima, do maksimalnih koji preferiraju aktivno sudjelovanje u potiskivanju subsinkronih njihanja. Serijski kompenzatori koji su zasnovani na energetskej elektronici zadovoljavaju čak i maksimalne zahtjeve uvođenjem aktivnog prigušnog djelovanja ili nekapacitivne karakteristike u subsinkronom području. Uz odgovarajuće strukturiranje i upravljanje moguće ih je primijeniti bez bojazni od subsinkrone rezonancije čime se omogućava potpuno korištenje prijenosne moći.

Poprečne naprave. Kao i u slučaju serijskih naprava, izvedbe poprečnih naprava mogu biti u obliku promjenljivih impedancija, promjenljivih elektroničkih izvora napona ili njihove kombinacije. U osnovi, sve poprečne naprave injektiraju struju u čvorište povezivanja sa sustavom (slika 6). Čak i promjenjiva poprečna impedan-

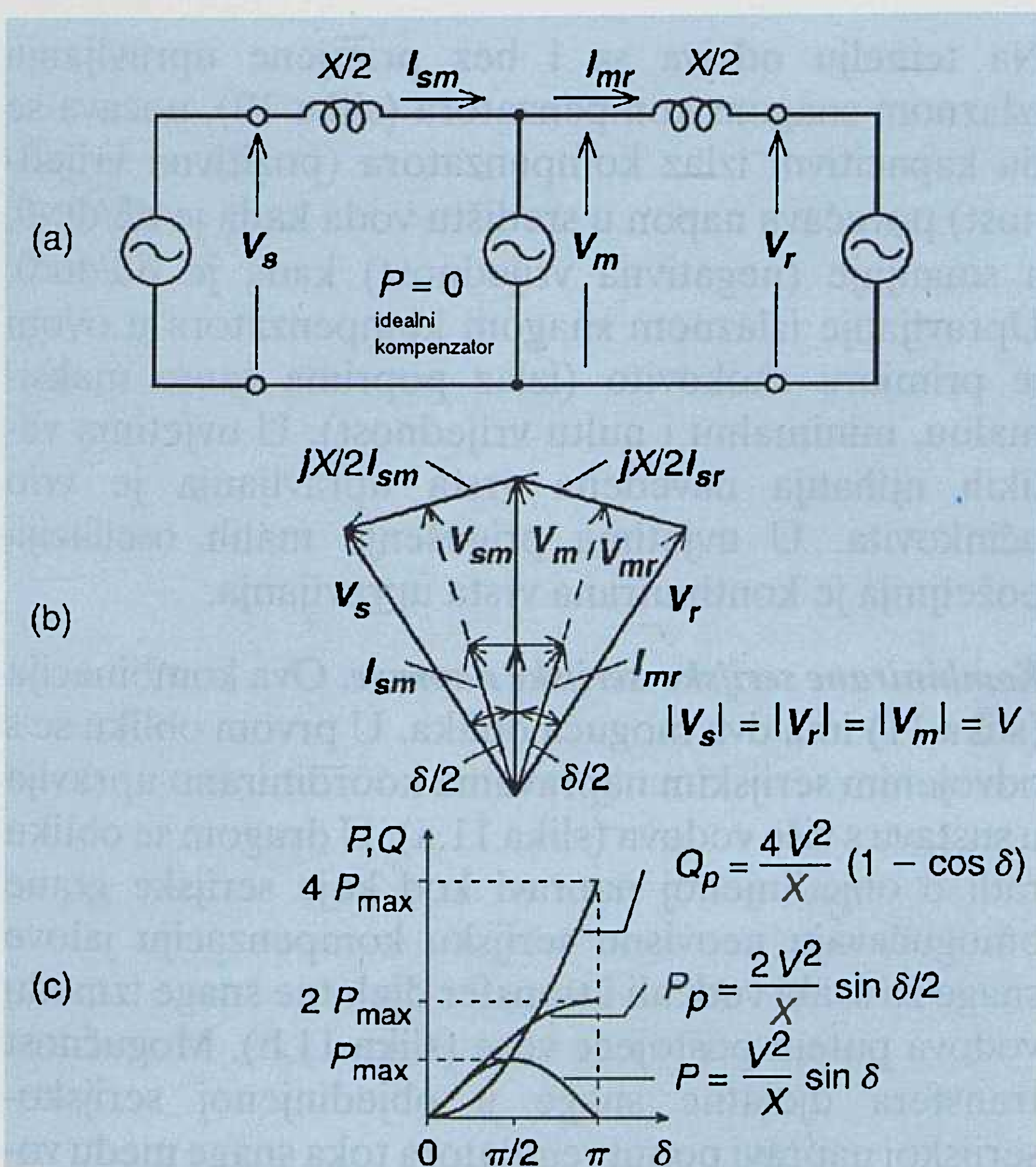


Slika 6. Poprečna naprava

cija spojena u čvorištu voda, uzrokuje promjenjivi tok struje kroz vod što se može shvatiti kao poprečno injektiranje struje. Ako je injektirana struja u položaju fazne okomice u odnosu prema naponu čvorišta priključka, poprečna naprava proizvodi ili troši promjenjivu jalovu snagu. Bilo koji drugi fazni položaj uzrokuje pojavu djelatne snage.

Poznato je da primjena odgovarajuće poprečne kompenzacije jalove snage utječe na povećanje prijenosne moći i poboljšanje profila napona uzduž voda. Svrha poprečne kompenzacije nalazi se u mijenjanju prirodnih električnih osobina prijenosnog voda kako bi ga se učinilo prilagodljivijim promjenama opterećenja. Stoga se poprečne prigušnice koriste za snižavanje napona u uvjetima malih opterećenja, a poprečni kondenzatori za podizanje napona pri velikim opterećenjima. Krajnji cilj primjene poprečne kompenzacije ipak se nalazi u povećanju prijenosne moći radi poboljšanja osobina sustava u stacionarnim i prijelaznim stanjima. Primjena kompenzacije u sredini (ili negdje između čvorišta) voda omogućava regulaciju napona u sredini voda u svrhu njegovog segmentiranja, odnosno na kraju radijalnog voda u svrhu izbjegavanja nestabilnosti napona. Također, koristi se za dinamičku regulaciju napona u svrhu poboljšanja prijelazne stabilnosti i prigušenja njihanja.

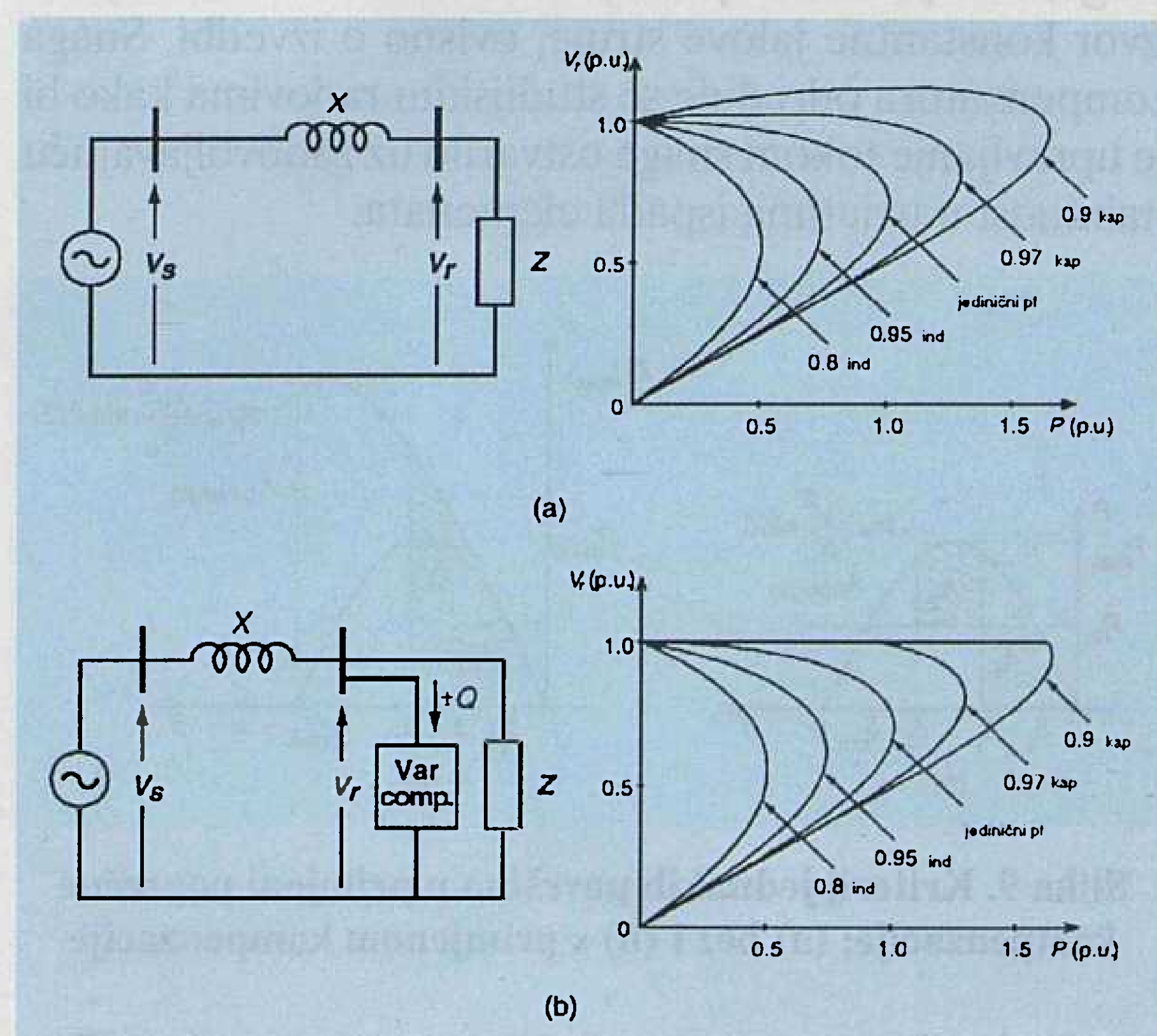
Na temelju jednostavnog dvostrojnog sustava s idealnim poprečnim kompenzatorom smještenim u sredini voda (slika 7.a), moguće je postaviti temeljne jednadžbe koje opisuju prednosti regulacije napona korištenjem poprečnog kompenzatora (slike 7.b-c).



Slika 7. Kompenzacija pomoću poprečne naprave; (a) dvostrojni sustav, (b) vektorski dijagram i (c) ovisnost djelatne i jalove snage o kutu

Iz ovisnosti djelatne i jalove snage o kutu prijenosa, uočava se da se s primjenom idealne poprečne kompenzacije u sredini voda značajno povećava snaga prijenosa (udvostručena najveća vrijednost), ali uz izrazito povećanje potrebe za jalovom snagom. Za sustav iz navedenog primjera, izbor sredine voda kao mjesta primjene poprečnog kompenzatora predstavlja najbolje rješenje. Naime, pad napona uzduž nekompenziranog voda najveći je u sredini. Štoviše, primjenom kompenzacije u sredini segmentira se vod u dva jednaka dijela s jednakim maksimalnim prijenosnim snagama. U slučaju nejednakih segmenata, maksimalna snaga prijenosa dužeg segmenta određivala bi ograničenje prijenosa ukupnog voda. Teorijski, najveća snaga koju je moguće prenijeti udvostručuje se udvostručenjem broja segmenata voda. S povećanjem broja segmenata, promjena napona uzduž voda značajno se smanjuje, približavajući se u idealnom slučaju konstantnom profilu.

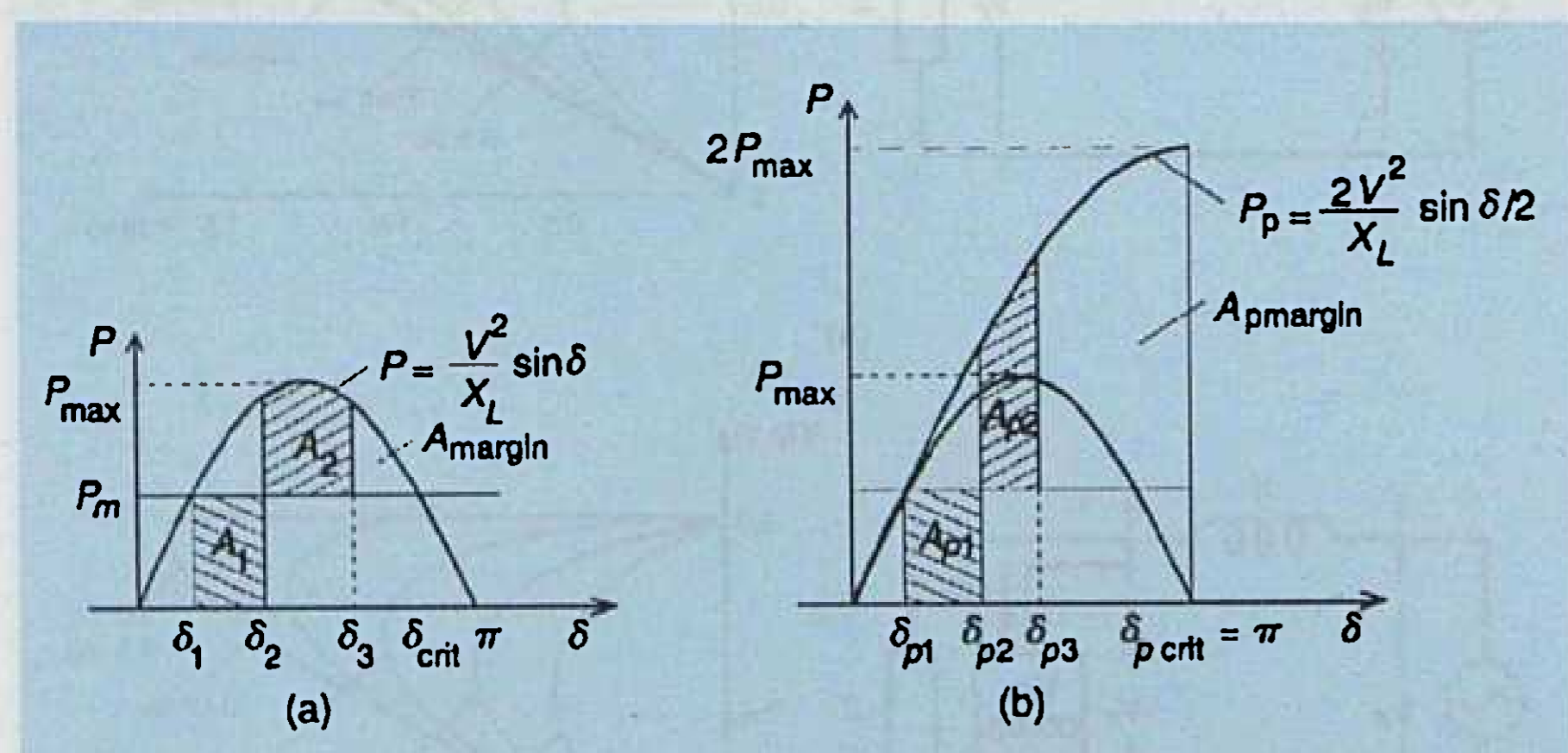
Prethodni slučaj poprečne kompenzacije smještene u sredini voda dvostrojnog sustava moguće je proširiti na posebni slučaj radijalnog prijenosa. Ako se pasivni teret koji troši snagu P pri naponu V_r priključi na kraj voda, bez primjene kompenzacije napon u tom čvorištu bio bi izrazito promjenjiv obzirom na promjenu tereta i faktora snage tereta (slika 8.a). Koljenasta točka V - P krivulje koja odgovara pojavi najveće snage prijenosa ukazuje na ublažavanje ograničenja stabilnosti napona priključkom kapacitivnog tereta, a pooštavanje priključkom induktivnog. Poprečna kompenzacija jalove snage učinkovito povećava najveću snagu prijenosa dobavljanjem jalove snage teretu i reguliranjem napona u čvorištu (slika 8.b). U ovom je slučaju krajnja točka prijenosa najbolje mjesto primjene kompenzatora, s obzirom da se u tom čvorištu napon najviše mijenja. Poprečna kompenzacija jalove snage često se u praktičnim primjenama koristi radi regulacije napona u za-



Slika 8. Utjecaj poprečne kompenzacije na stabilnost napona; (a) bez i (b) s regulacijom napona u čvorištu

danom čvorištu u kojem dolazi do velikih promjena opterećenja ili radi održavanja napona u slučajevima ispada generatora ili vodova na početnoj strani prijenosa. Vrlo često se jedno područje opterećenja napaja sa strane dvaju ili više generatora s nezavisnim prijenosnim vezama. Ispad jednog od izvora može iznenada povećati opterećenje na preostalom dijelu prijenosnog sustava i uzrokovati ozbiljan pad napona koji se u krajnjem slučaju može razviti do sloma napona.

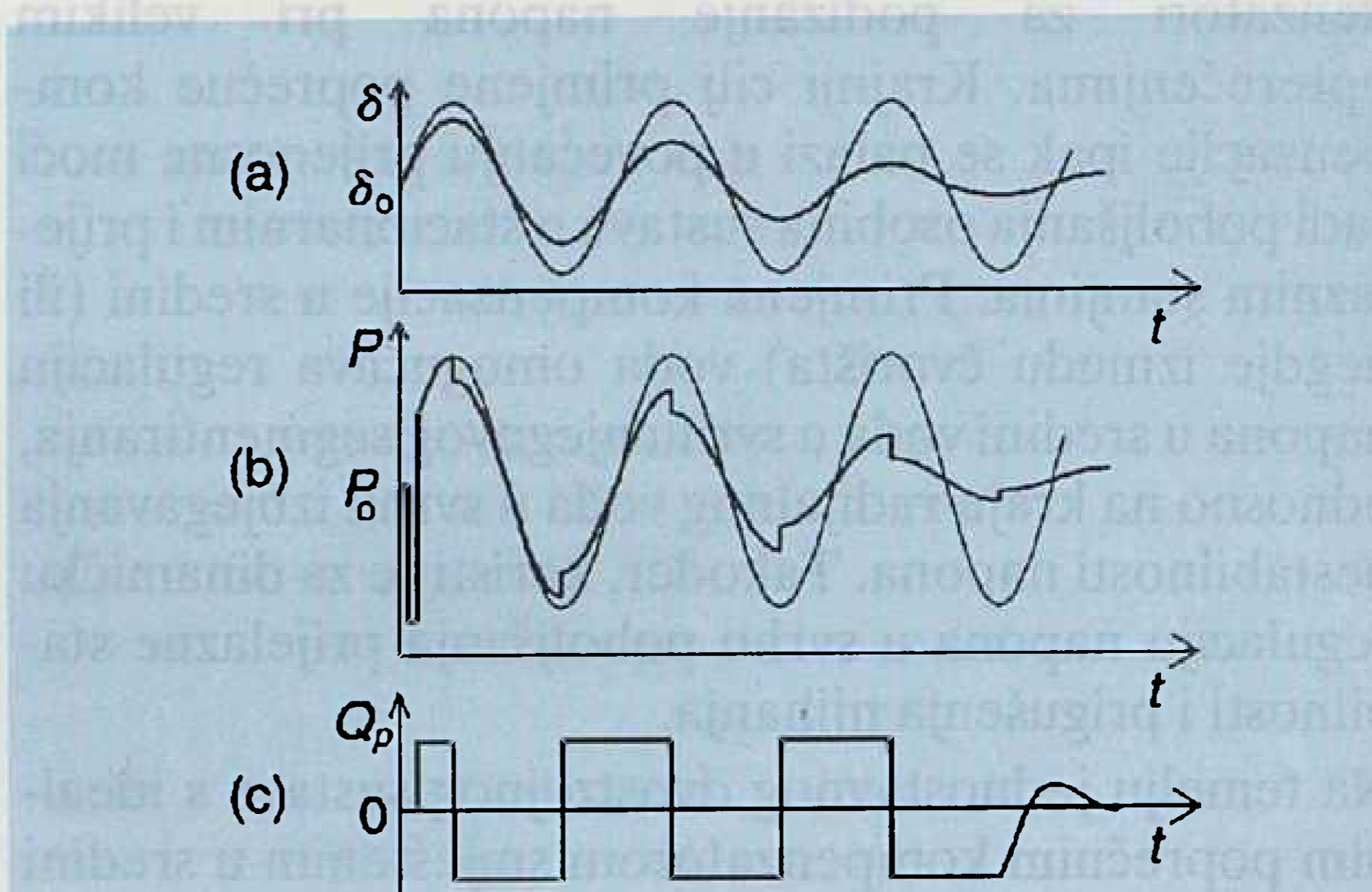
Budući da se primjenom poprečne kompenzacije jalove snage povećava najveća snaga prijenosa, racionalno je očekivati da je uz odgovarajuću brzinu upravljanja moguće utjecati na promjene tokova snage u prijelaznim stanjima. Na taj bi se način ublažila ograničenja postavljena prijelaznom stabilnosti. Prema kriteriju jednakih površina za slučajeve sa i bez poprečne kompenzacije (objašnjenje slično kao i slučaju serijske kompenzacije) uočava se značajna razlika između veličine margina prijelazne stabilnosti. Margina u slučaju bez primjene kompenzacije A_{margin} (slika 9.a) znatno je manja od margine u slučaju s primjenom kompenzacije A_{pmargin} (slika 9.b), uz pretpostavku primjene idealnog poprečnog kompenzatora. Time se zapravo pretpostavlja da iznos napona u sredini voda ostaje konstantan tijekom cijelog razdoblja razmatranja (osim za vrijeme trajanja kvara) te da njegov fazni kut slijedi njihanje kuta generatora. Dakle, kompenzator ne sudjeluje u razmjeni djelatne snage sa sustavom, ali kontinuirano dobavlja jalovu snagu. Potreba za jalovom snagom značajno raste s porastom djelatne snage prijenosa i u uvjetima najvećeg prijenosa poprima dvostruko veći iznos od djelatne snage. Zbog ekonomičnosti najveća izlazna jalova snaga stvarnog poprečnog kompenzatora značajno je manja od one koju zahtijeva potpuna kompenzacija. Stoga stvarni kompenzatori djeluju kao idealni samo dok su potrebe tereta manje od nazivne snage kompenzatora. Iznad nazivne snage, kompenzator postaje konstantna reaktancija ili izvor konstantne jalove struje, ovisno o izvedbi. Snaga kompenzatora određuje se studijskim radovima kako bi se upravljanje tokom snage ostvarilo uz zadovoljavajuću stabilnost u uvjetima ispada elemenata.



Slika 9. Kriterij jednakih površina u primjeni poprečne kompenzacije; (a) bez i (b) s primjenom kompenzacije

U slučaju da sustav ima nedostatan stupanj prigušenja, mali poremećaj može uzrokovati njihanje kuta generatora oko stacionarne vrijednosti (slika 10). Njihanje

kuta rezultira odgovarajućim njihanjem snage. Nedostatak prigušenja u nekim je sustavima izrazito naglašen pa se tretira kao ograničavajući faktor prijenosne moći. S obzirom da je njihanje snage dinamička pojava, poprečna kompenzacija treba biti promjenjivog karaktera. Time bi se napon u sredini voda mijenjao i prilagođavao ubrzavajućem i usporavajućem njihanju. Ako se generator u njihanju ubrzava i povećava kut δ ($d\delta/dt > 0$), nužno je povećati električnu snagu prijenosa kako bi se kompenzirao višak mehaničke ulazne snage. U obrnutom slučaju, ako se generator usporava i smanjuje kut δ ($d\delta/dt < 0$), električnu snagu potrebno je smanjiti kako bi se kompenzirao manjak mehaničke ulazne snage. Pretpostavlja se da je mehanička ulazna snaga konstantna u vremenskom rasponu razdoblja njihanja.

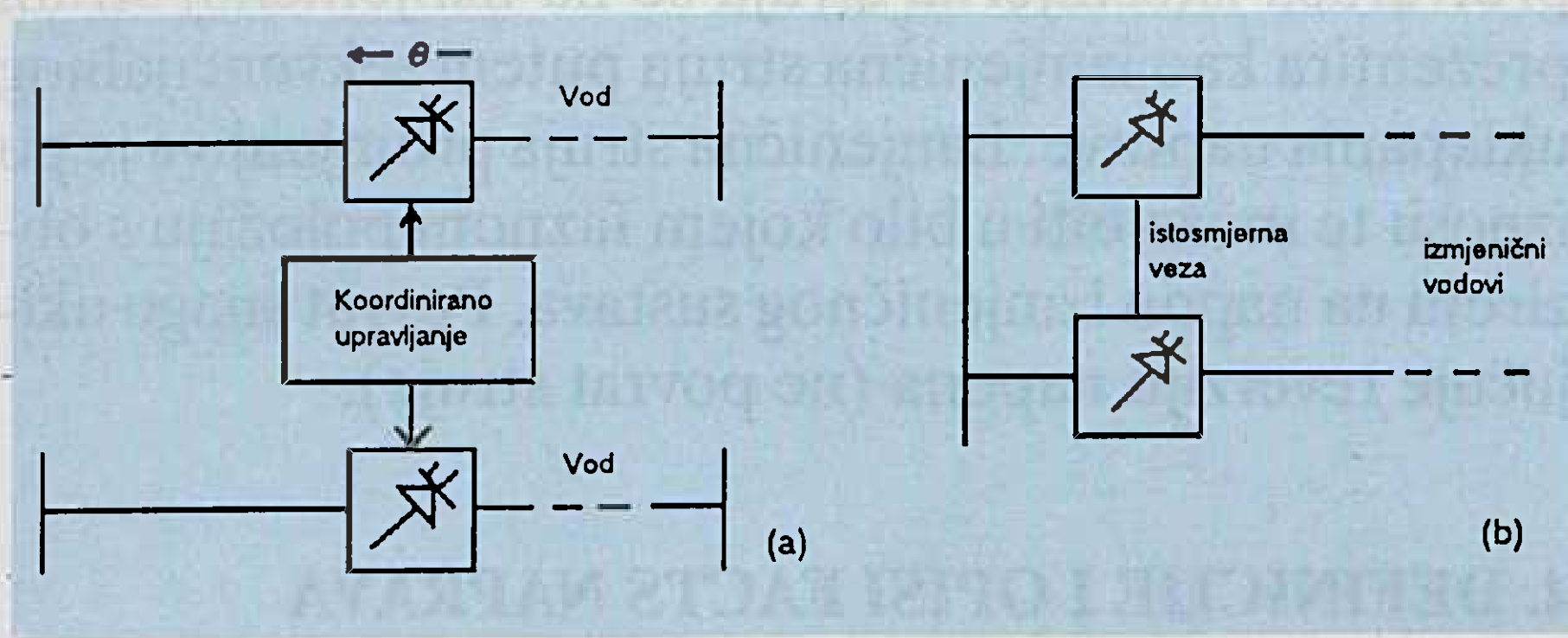


Slika 10. Prigušenje njihanja primjenom poprečne kompenzacije; (a) kut generatora, (b) djelatna snaga prijenosa i (c) izlazna jalova snaga kompenzatora

Na temelju odziva sa i bez primjene upravljanja izlaznom snagom kompenzatora (slika 10), uočava se da kapacitivni izlaz kompenzatora (pozitivna vrijednost) povećava napon u središtu voda kada je $d\delta/dt > 0$, a smanjuje (negativna vrijednost) kada je $d\delta/dt < 0$. Upravljanje izlaznom snagom kompenzatora u ovom je primjeru skokovito (izlaz poprima samo maksimalnu, minimalnu i nultu vrijednost). U uvjetima velikih njihanja navedena vrsta upravljanja je vrlo učinkovita. U uvjetima prigušenja malih oscilacija poželjnija je kontinuirana vrsta upravljanja.

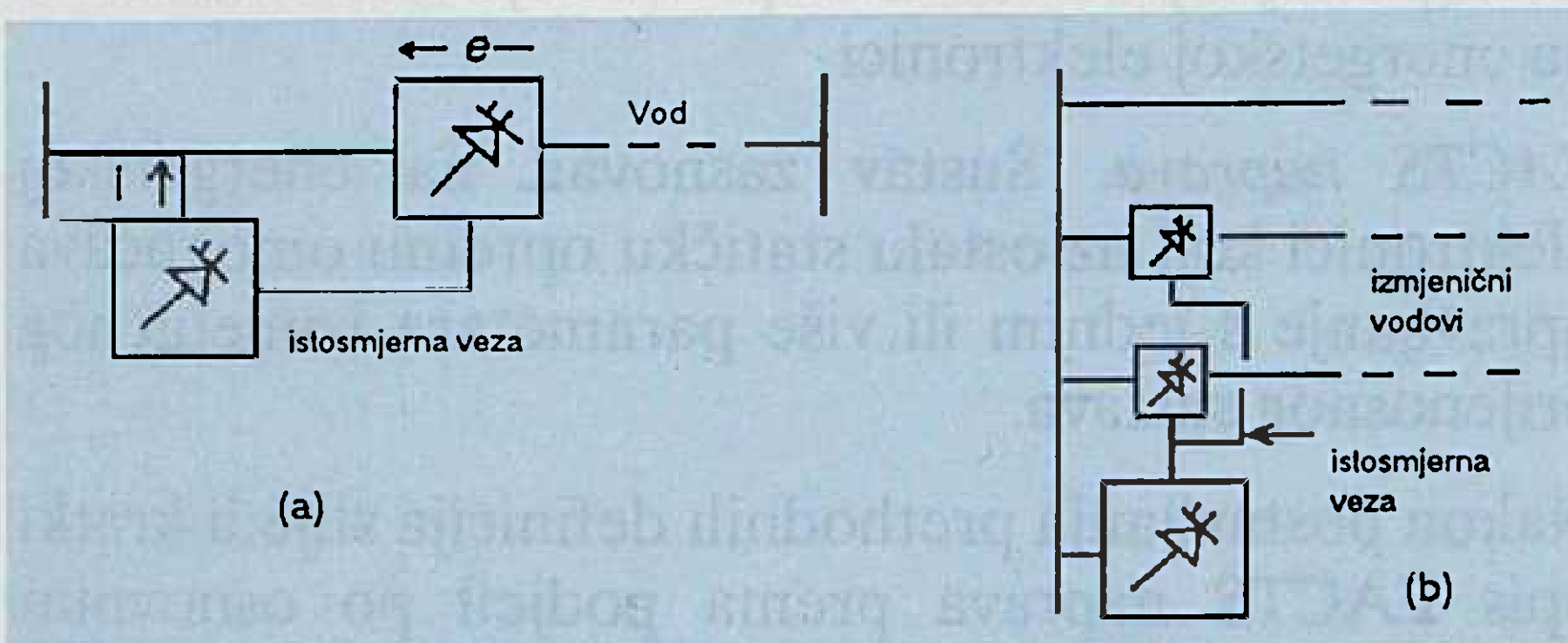
Kombinirane serijsko-serijske naprave. Ova kombinacija (slika 11) ima dva moguća oblika. U prvom obliku se s odvojenim serijskim napravama koordinirano upravlja u sustavu s više vodova (slika 11.a). U drugom se obliku radi o objedinjenoj napravi kod koje serijske grane omogućavaju neovisnu serijsku kompenzaciju jalove snage za svaki vod, ali i transfer djelatne snage između vodova putem postojeće veze (slika 11.b). Mogućnost transfera djelatne snage u objedinjenoj serijsko-serijskoj napravi poput regulatora toka snage među vodovima (eng. Interline Power Flow Controller), omogućava ravnotežu između toka djelatne i jalove snage u vodovima te time maksimizira iskoristivost prijenosnog sustava. Termin "objedinjeni" u ovom

slučaju označava stanje u kojem su svi dc terminali navedene naprave spojeni zajedno radi transfera djelatne snage.



Slika 11. Kombinirane serijsko-serijske naprave; (a) odvojene i koordinirano upravljane i (b) objedinjene i povezane s dc vezom

Kombinirane serijsko-poprečne naprave. Ova kombinacija ima oblik razdvojenih poprečnih i serijskih naprava kojima se koordinirano upravlja ili oblik objedinjenog regulatora toka snage (eng. Unified Power Flow Controller) s objedinjenim poprečnim i serijskim napravama. U osnovi, kombinirane poprečne i serijske naprave injektiraju struju u sustav pomoću poprečne naprave te napon u seriji s vodom pomoću serijske naprave (slika 12.a). Kada se poprečna i serijska naprava objedine javlja se razmjena djelatne snage između serijske i poprečne naprave putem istosmjerne veze. Moguća je i izvedba kod koje svaki vod zahtijeva posebnu serijsku napravu (slika 12.b), osobito ako se primjenom želi izbjeći problem ispada voda.



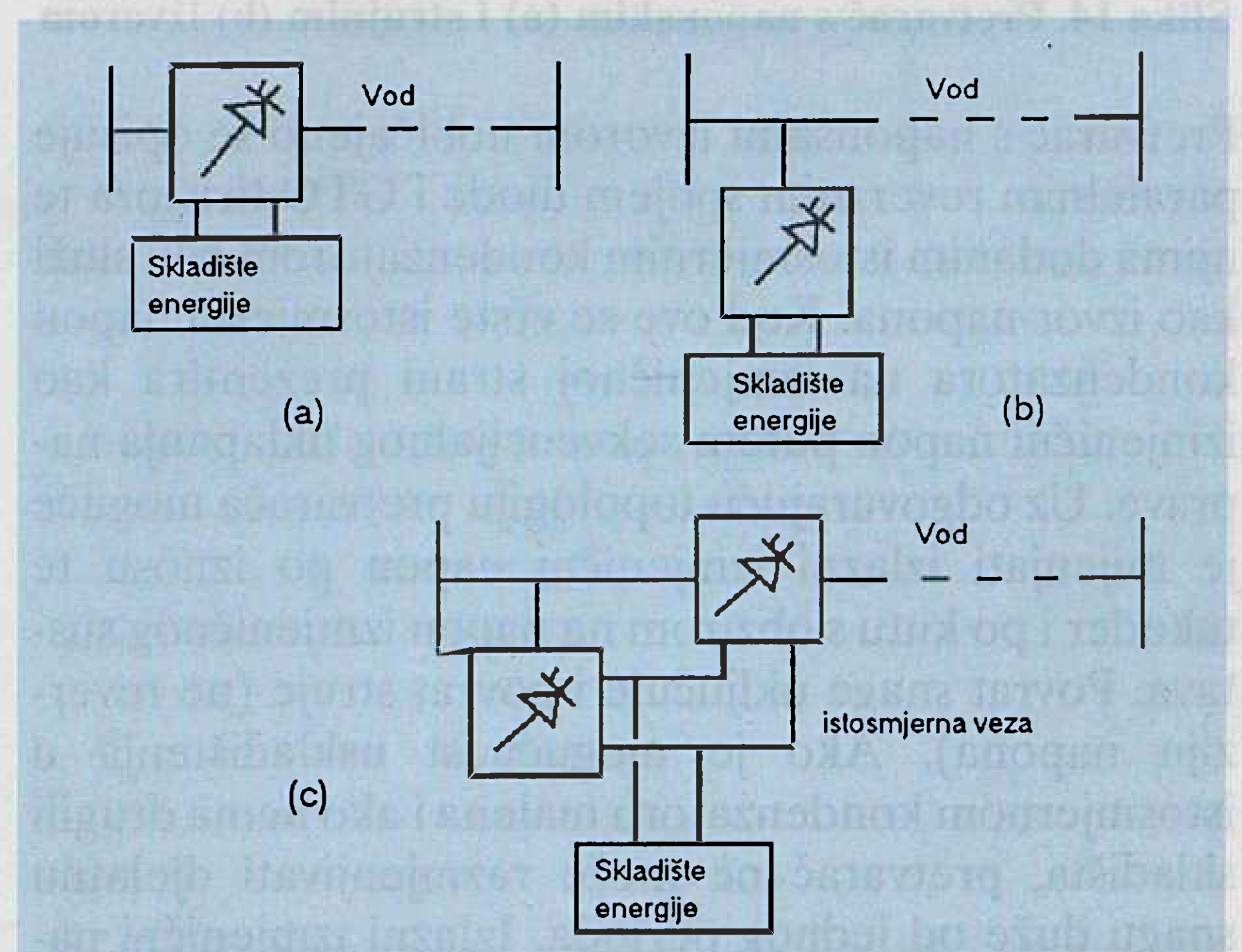
Slika 12. Kombinirane serijsko-poprečne naprave; primjena serijske grane samo na jednom vodu (a) i na više vodova (b)

Značajno je napomenuti da serijski spojena naprava utječe na napon i time na tok struje odnosno snage. Ako je zadaća upravljati tokom struje/snage i prigušiti njihane tada je serijska naprava uz zadano nazivno dimenzioniranje nekoliko puta moćnija od poprečne naprave. Poprečna naprava, s druge strane, predstavlja strujni izvor koji injektira ili povlači struju iz voda. Stoga je poprečna naprava korisna za regulaciju napona u čvorištu priključenja putem injektiranja samo jalove snage ili kombiniranim injektiranjem djelatne i jalove snage radi učinkovitije regulacije napona i prigušenja njihane napona. Time se ne želi reći da serijske naprave nije moguće koristiti za regulaciju napona. Promjene napona uvelike su posljedica pada napona na serijskoj impedanciji voda. Stoga se dodavanjem ili oduzimanjem napona u serijskoj grani može učinkovito poboljšati naponski profil. Poprečna na-

prava ipak je znatno bolji izbor ako se zahtijeva samo regulacija napona u čvorištu.

Značajna prednost poprečne naprave nalazi se u njezinom utjecaju samo na jedno čvorište neovisno o pojedinačnim vodovima koji su incidentni sa čvorištem priključka. Ipak to nije odlučujući faktor u primjeni poprečne naprave budući da je zahtijevano nazivno dimenzioniranje serijske naprave maleno u usporedbi s poprečnom napravom. Također, poprečna naprava ne omogućava upravljanje tokom snage u vodu. S druge strane, serijske naprave se projektiraju tako da imaju i utjecaj na sustav tijekom ispada i dinamičkih preopterećenja. Tijekom stanja kvara (kratki spoj), naprave mogu biti privremeno premoštene ili opremljene odvodnicima ako je struja kvara prevelika. Navedeni argumenti sugeriraju da bi se kombiniranjem serijske i poprečne naprave postigla najbolja svojstva od obje vrste. Time bi se uz regulaciju napona istodobno omogućilo učinkovito upravljanje tokovima snage.

Zasnovanost FACTS naprava. FACTS naprave zasnovane su ili na tiristorima koji nemaju mogućnost isključenja primjenom signala na upravljačku elektrodu (struja se prekida u trenutku prolaska kroz nultu vrijednost sinusoide) ili na onima koji tu mogućnost imaju (eng. GTO, Gate Turn-Off Capability). Naprave koje tu mogućnost imaju zasnovane su na dc/ac pretvaračima koji mogu razmjenjivati djelatnu i/ili jalovu snagu s ac sustavom. Ako razmjena uključuje samo jalovu snagu, naprava je opremljena minimalnim uskladištenjem na istosmjernoj strani. Međutim, ako je fazni kut između struje i napona različit od 90° , uskladištenje na istosmjernoj strani može se razlikovati od minimalnog koje je potrebno u pogonu pretvarača kao izvora samo jalove snage. Dakle, potrebno je skladište energije. Svaka od serijskih, poprečnih ili kombiniranih serijsko-poprečnih naprava, općenito može uključivati u sebi skladište poput kondenzatora, baterije ili supravodljivog magneta čime se dodaje nova dimenzija FACTS tehnologiji (slika 13). U tim



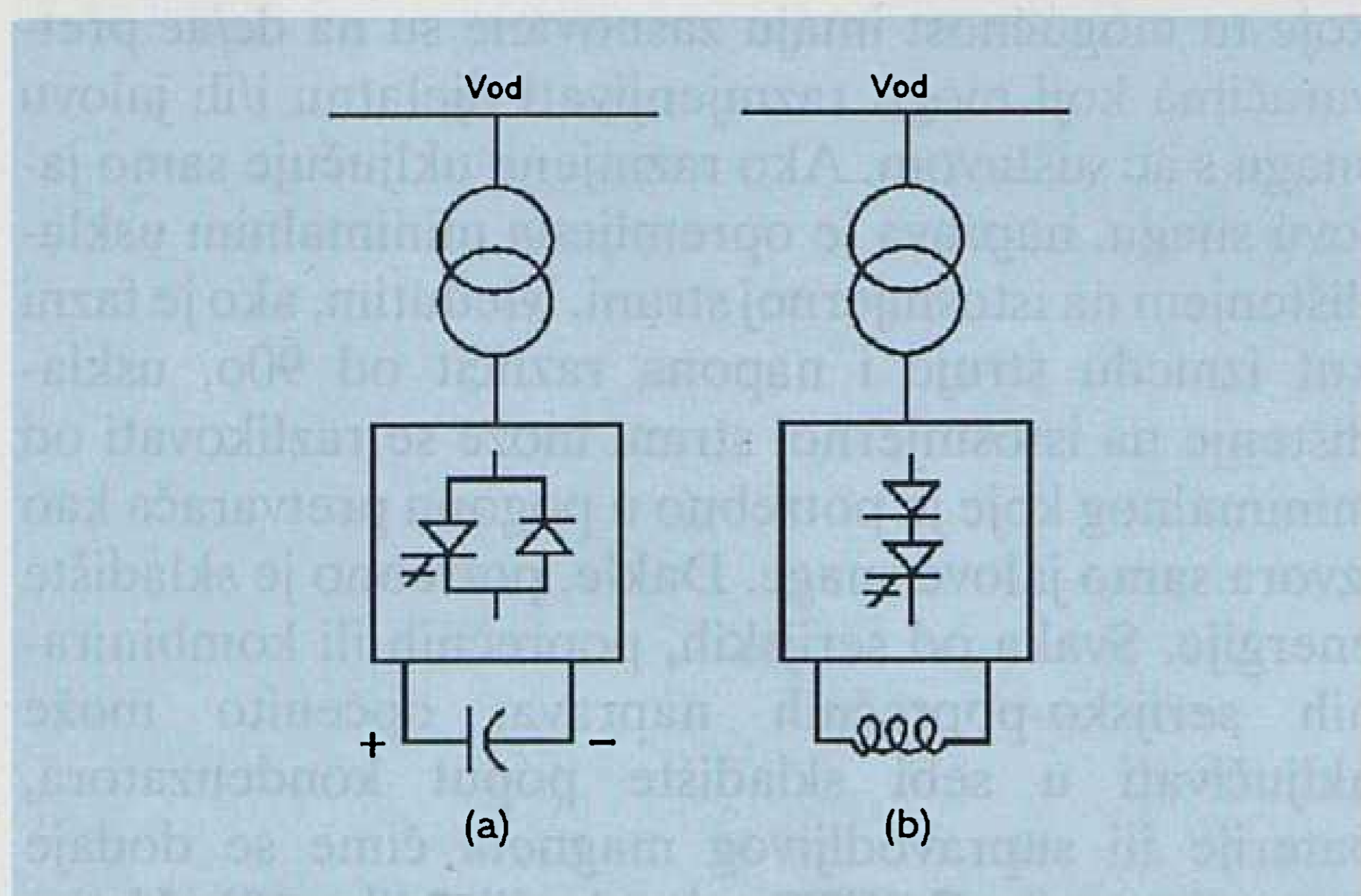
Slika 13. Naprave s dodatnim uskladištenjem energije; (a) serijska, (b) poprečna i (c) kombinirana serijsko-poprečna naprava

slučajevima korisnost je vrlo značajna. Naprave s dodatnim uskladištenjem učinkovitije upravljaju dinamikom sustava zahvaljujući dinamičkoj izmjeni djelatne snage sa sustavom.

Naprave se mogu također zasnovati i na pretvaračima s pulsno-širinskom modulacijom radi smanjenja utjecaja harmoničkih članova. Pretvarač je moguće projektirati tako da proizvodi ispravan valni oblik i time djeluje kao aktivni filter. Također, njime je moguće upravljati tako da uravnotežuje nesimetrične napone uključujući transfer energije između faza. Sve dodatne funkcije moguće je izvoditi istodobno ako je pretvarač tako projektiran.

Dakle, moguće je reći da je pri rješavanju zadanog problema potrebno vrednovati sve opcije u rasponu od serijske i poprečne do kombinirane serijsko-poprečne kao i opcije sa i bez dodatnog uskladištenja energije.

Kod FACTS naprava zasnovanih na pretvaračima s tiristorima koji imaju mogućnost isključenja primjenom signala na upravljačku elektrodu, moguće je razlikovati dvije vrste: pretvarači s naponskim izvorom (slika 14.a) i pretvarači sa strujnim izvorom (slika 14.b). Sa stajališta troškova, preferira se pretvarač s naponskim izvorom koji ujedno predstavlja i osnovu za predstavljanje većine pretvarački zasnovanih FACTS naprava.



Slika 14. Pretvarač s naponskim (a) i strujnim (b) izvorom

Pretvarač s naponskim izvorom uobičajeno se opisuje paralelnim reverznim spojem diode i GTO tiristora te njima dodanim istosmjernim kondenzatorom koji služi kao izvor napona. Kod ove se vrste istosmjerni napon kondenzatora na izmjeničnoj strani prezentira kao izmjenični napon putem sekvencijalnog uklapanja naprave. Uz odgovarajuću topologiju pretvarača moguće je mijenjati izlazni izmjenični napon po iznosu te također i po kutu s obzirom na napon izmjeničnog sustava. Povrat snage uključuje i povrat struje (ne reverziju napona). Ako je mogućnost uskladištenja u istosmjernom kondenzatoru malena i ako nema drugih skladišta, pretvarač ne može razmjenjivati djelatnu snagu duže od jednog perioda. Izlazni izmjenični napon održava se pod kutem od 90° u odnosu prema struji voda te se pretvarač koristi samo za razmjenu jalove snage.

Pretvarač sa strujnim izvorom opisuje se serijskim spojem diode i GTO tiristora te njima dodanom istosmjernom prigušnicom kao izvorom struje. Kod ove vrste pretvarača istosmjerna struja se na izmjeničnoj strani prezentira kao izmjenična struja putem sekvencijalnog uklapanja naprave. Izmjenična struja promjenjiva je po iznosu te može biti u bilo kojem faznom položaju s obzirom na napon izmjeničnog sustava. Povrat snage uključuje reverziju napona (ne povrat struje).

4. DEFINICIJE I OPISI FACTS NAPRAVA

Jedan od problema s kojima se susreće FACTS tehnologija nalazi se i u usvajanju velikog broja novih pojmova i skraćenica, kako od proizvođača opreme tako i od autora raznih teorijskih radova. Prije kratkog opisa svake od FACTS naprava, nužno je postaviti slijedeće elementarne definicije:

Prilagodljivost prijenosa električne energije. Sposobnost prilagođavanja promjenama u prijenosnom sustavu ili uvjetima pogona uz zadržavanje dostatnih sigurnosnih margina stacionarnog i prijelaznog stanja.

Prilagodljivi izmjenični prijenosni sustav (eng. FACTS, Flexible AC Transmission System). Izmjenični prijenosni sustav s uključenim napravama zasnovanim na energetskej elektronici te ostalim statičkim napravama koje služe poboljšanju upravljivosti i povećanju prijenosne moći. Pojam "ostalnih statičkih naprava" odnosi se na postojanje statičkih naprava koje nisu zasnovane na energetskej elektronici.

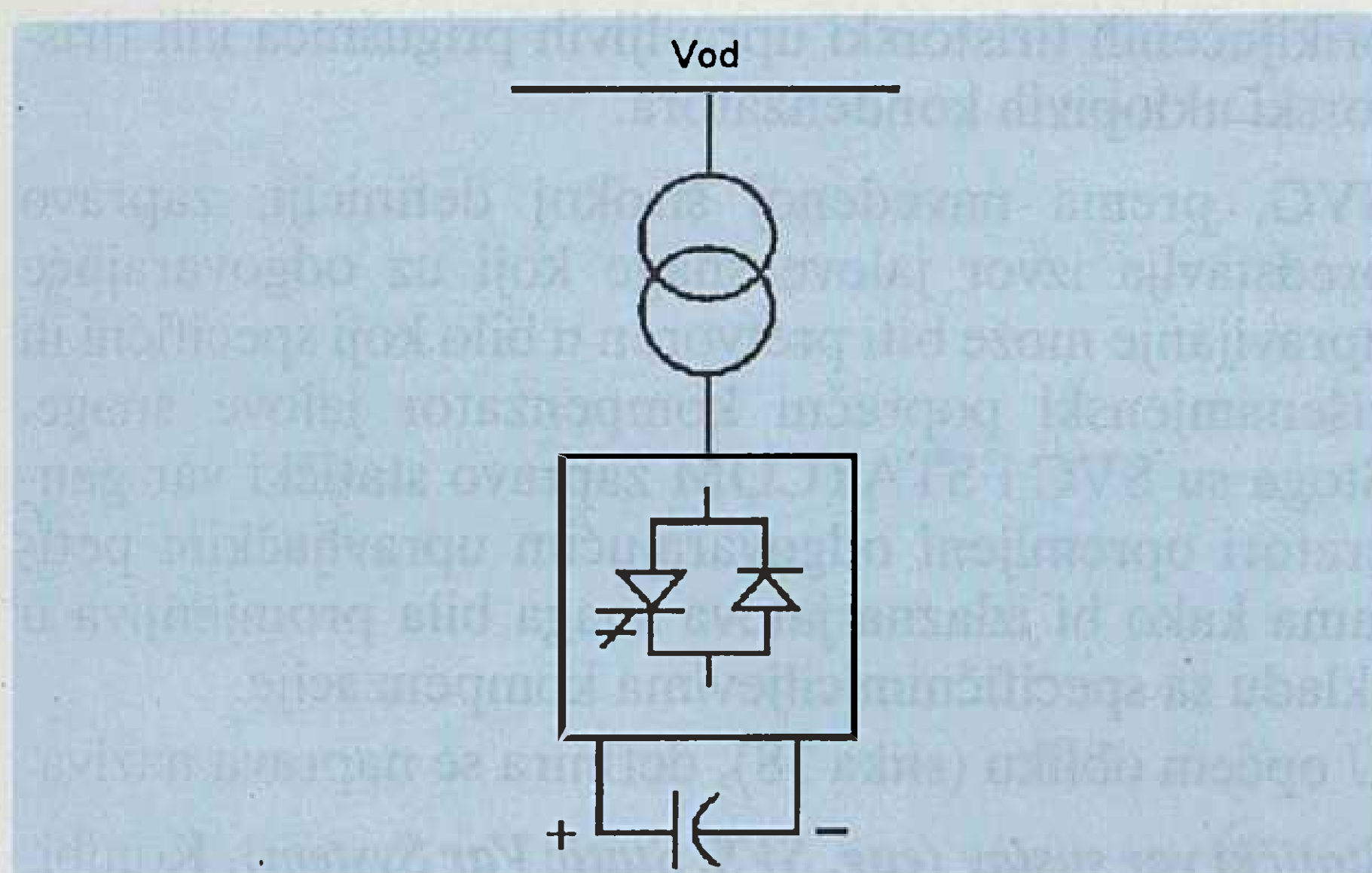
FACTS naprava. Sustav zasnovan na energetskej elektronici koji uz ostalu statičku opremu omogućava upravljanje s jednim ili više parametara izmjeničnog prijenosnog sustava.

Nakon postavljanja prethodnih definicija slijedi kratki opis FACTS naprava prema podjeli po osnovnim vrstama.

1. Poprečne naprave

Statički sinkroni kompenzator (eng. STATCOM, Static Synchronous Compensator). Statički sinkroni generator u pogonu kao poprečno priključeni statički var kompenzator, čija kapacitivna ili induktivna izlazna struja može biti upravljiva neovisno o naponu izmjeničnog sustava.

STATCOM je jedna od ključnih FACTS naprava. Može biti zasnovan na pretvaračima naponskog ili strujnog izvora. S općeg stajališta troškova, preferiraju se pretvarači s naponskim izvorom (slika 15). Kod njih se s izlaznim izmjeničnim naponom upravlja na način da se automatskim reguliranjem napona istosmjernog kondenzatora koji služi kao naponski izvor pretvarača utječe na zahtijevanu razinu injektirane jalove struje u čvorište izmjeničnog sustava. STATCOM može biti projektiran i da djeluje kao aktivni filter radi neutraliziranja harmonika.

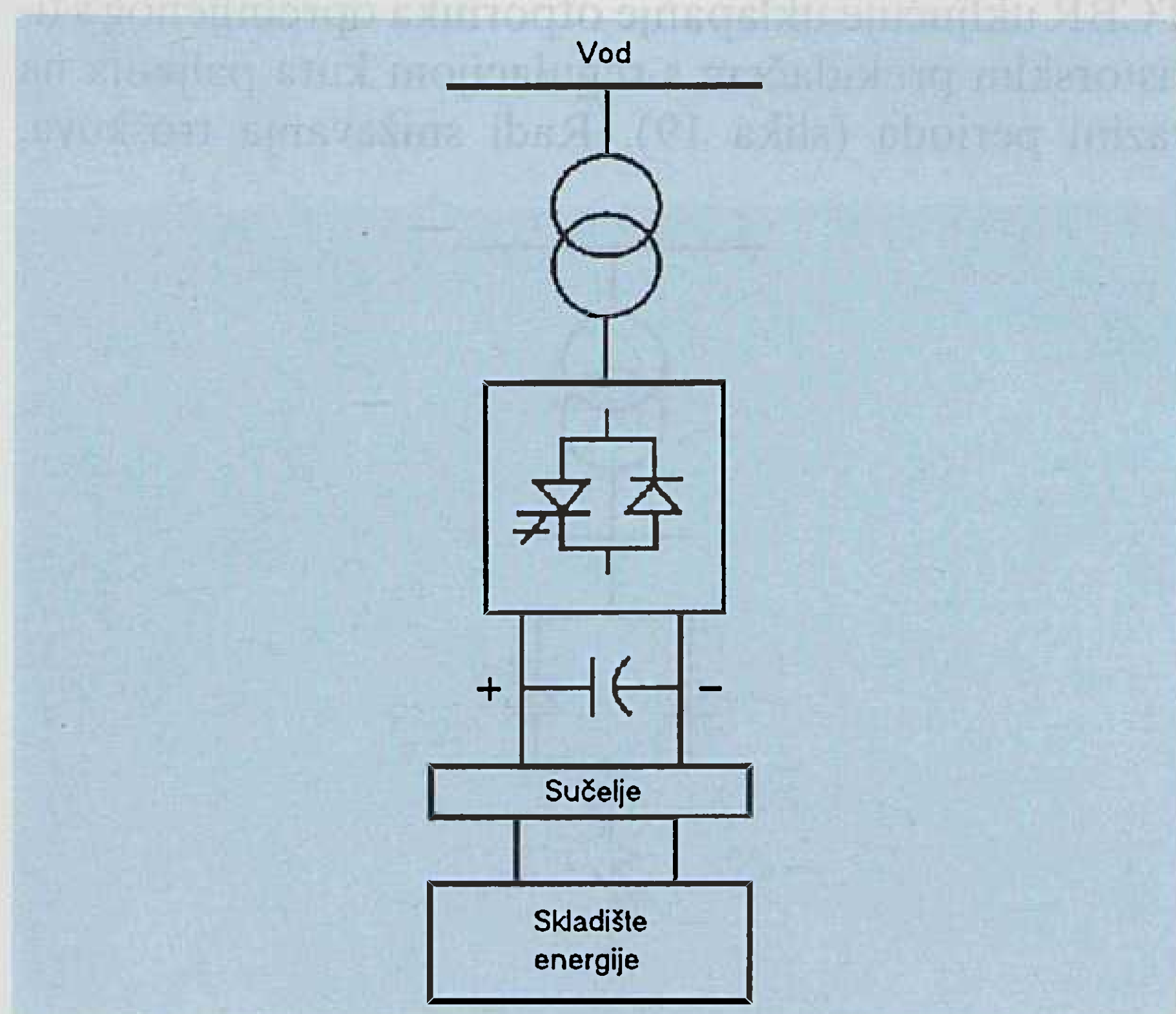


Slika 15. Statički sinkroni kompenzator, STATCOM

Prema postavljenoj definiciji STATCOM je samo jedan član u spektru poprečnih naprava u kojem je moguće uključiti i izvor djelatne snage ili skladište energije na istosmjernoj strani tako da injektirana struja može imati i djelatnu komponentu. Takva naprava se definira kao

Statički sinkroni generator (eng. SSG, Static Synchronous Generator). Statički samokomutirani energetski pretvarač napajan iz odgovarajućeg skladišta energije i pogonjen u svrhu proizvodnje promjenjivog višefaznog izlaznog napona. Priklučen je na izmjenični sustav kako bi s njim ostvario razmjenu djelatne i jalove snage koje su međusobno neovisno upravljive.

SSG (slika 16) je zapravo kombinacija STATCOM-a i skladišta energije. Naziv, SSG, u sebi uključuje općenito priključenje bilo kojeg skladišta energije (baterija, zamašna masa, supravodljivi magnet, veliki istosmjerni kondenzator, drugi ispravljači...). Uobičajena je primjena elektroničkog sučelja ("čoper") između skladišta energije i pretvarača. Kod pretvarača s naponskim izvorom, skladište energije koristi se u svrhu odgovarajuće kompenzacije pražnjenja kondenzatora kako bi se održavao zahtijevani napon kondenzatora.



Slika 16. Statički sinkroni generator, SSG

Unutar definicije SSG-a nalazi se i naprava poznata kao **Baterijski sustav uskladištenja energije (eng. BESS, Battery Energy Storage System).** Sustav uskladištenja energije na kemijskoj osnovi koji se sastoji od poprečno priključenih pretvarača s naponskim izvorom. Ima sposobnost brzog prilagođavanja količine energije koja se razmjenjuje s izmjeničnim sustavom.

Kod primjena u prijenosnom sustavu, veličina BESS skladišne jedinice uglavnom je mala (nekoliko desetaka MWh). Ako je pretvarač dovoljno dimenzioniran moguće ga je koristiti u rješavanju problema prijelazne stabilnosti na način da kratkotrajno razmjenjuje djelatnu snagu s visokim MW/MWh omjerom. Pretvarač je također moguće koristiti u razmjeni jalove snage s izmjeničnim sustavom u skladu s njegovom nazivnom snagom. U slučaju u kojem ne dolazi do razmjene djelatne snage s izmjeničnim sustavom, pretvarač se koristi za punjenje baterije odgovarajućom brzinom.

Slijedeći podskup SSG-a čini naprava poznata kao

Sustav uskladištenja energije pomoću supravodljivog magneta (eng. SMES, Superconducting Magnetic Energy Storage). Supravodljivi elektromagnetski sustav uskladištenja energije koji sadrži elektroničke pretvarače. Može brzo injektirati ili apsorbirati djelatnu i/ili jalovu snagu, odnosno dinamički upravljati tokom snage u izmjeničnom sustavu.

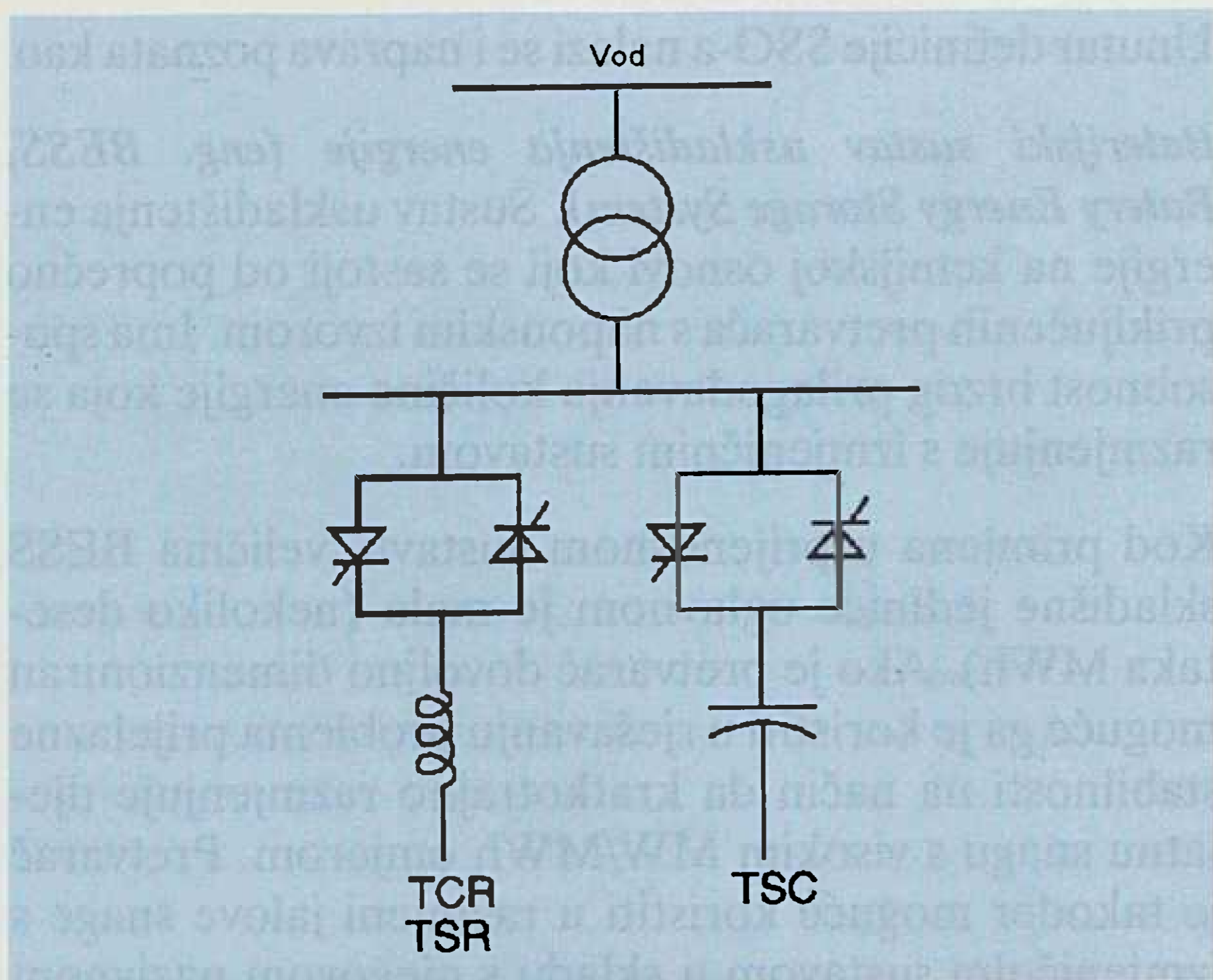
Budući da se istosmjerna struja magneta ne mijenja brzo, izlazna snaga magneta se mijenja putem upravljanja naponom magneta uz odgovarajuće elektroničko sučelje.

Jedna od prihvaćenih poprečnih naprava poznata je kao

Statički var kompenzator (eng. SVC, Static Var Compensator). Statički generator jalove snage u poprečnom spoju koji se koristi radi razmjene kapacitivne ili induktivne struje sa sustavom kako bi upravljao sa specifičnim parametrima sustava (uobičajeno s naponom čvorišta).

SVC se općenito odnosi na tiristorski upravljive ili tiristorski uklopive kondenzatore ili neku od kombinacija kondenzatora i prigušnica (slika 17). Zasnovan je na tiristorima koji nemaju mogućnost isključenja signalom na upravljačku elektrodu. U njemu je uključena posebna oprema za razmjenu jalove snage; tiristorski upravljiva ili tiristorski uklopiva prigušnica za apsorpciju jalove snage te tiristorski uklopiv kondenzator za dobavu jalove snage. Tretira se kao jeftiniji nadomjestak za STATCOM iako to ne mora nužno biti slučaj, pogotovo ako se usporedba ne zasniva samo na veličini izgradnje.

Tiristorski upravljiva prigušnica (eng. TCR, Thyristor Controlled Reactor). Tiristorski upravljiva prigušnica u poprečnom spoju čija je efektivna reaktancija kontinuirano promjenjiva putem djelomičnog vođenja tiristorskog ventila.



Slika 17. Statički var kompenzator, SVC

TCR je podvrsta SVC-a kod koje se s vremenom vođenja te sa strujom prigušnice upravlja korištenjem tiristoriskog prekidača. Tiristori su upravljivi putem kuta paljenja.

Tiristoriski uklopiva prigušnica (eng. *TSR, Thyristor Switched Reactor*). Tiristoriski uklopiva prigušnica u poprečnom spoju čija je efektivna reaktancija skokovito promjenjiva putem pune/nulte vodljivosti tiristoriskog ventila.

TSR je slijedeća podvrsta SVC-a. Naprava je načinjena od nekoliko poprečnih prigušnica koje se uključuju i isključuju tiristoriskim prekidačima bez upravljanja kutem paljenja. Time se postižu zahtijevane skokovite promjene jalove snage koja se troši iz sustava. Korištenjem tiristoriskih prekidača bez upravljanja kutem paljenja postižu se niži troškovi i gubici, ali bez mogućnosti kontinuirane promjene.

Tiristoriski uklopivi kondenzator (eng. *TSC, Thyristor Switched Capacitor*). Tiristoriski uklopivi kondenzator u poprečnom spoju čija je efektivna reaktancija skokovito promjenjiva putem pune/nulte vodljivosti tiristoriskog ventila.

TSC je također podvrsta SVC-a kod koje se tiristoriski prekidači koriste radi uključivanja i isključivanja (bez regulacije kuta paljenja) poprečnih kondenzatora. Time se postižu zahtijevane skokovite promjene jalove snage koja se injektira u sustav. Za razliku od poprečnih prigušnica, poprečni kondenzatori ne mogu biti kontinuirano upravljivi primjenom regulacije kuta paljenja.

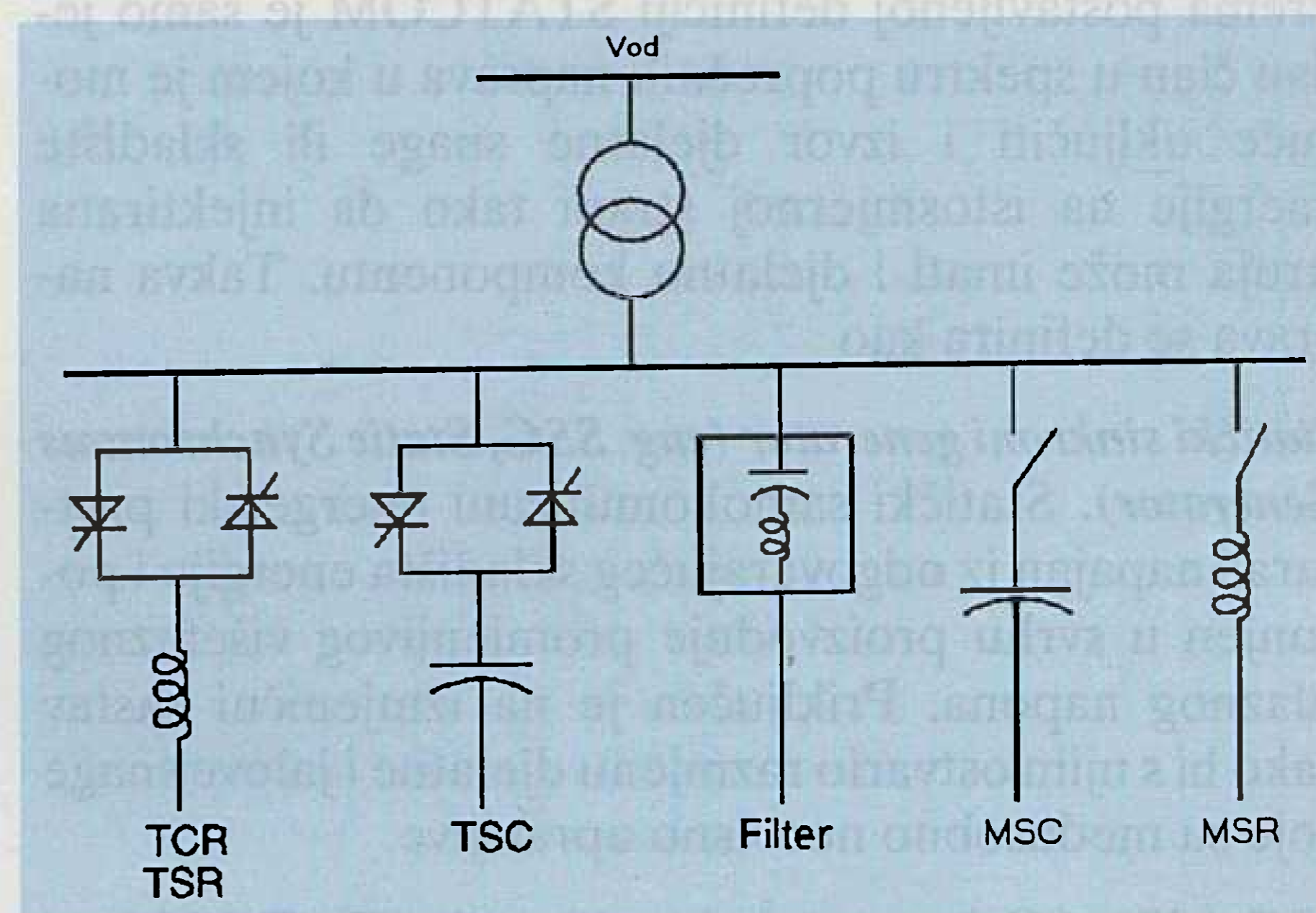
U općem obliku, moguće je definirati napravu naziva

Statički var generator ili trošilo (eng. *SVG, Static Var Generator or Absorber*). Statička električna naprava, oprema ili sustav koji je sposoban razmjenjivati upravljivu kapacitivnu i/ili induktivnu struju s izmjeničnim sustavom te time proizvoditi ili trošiti jalovu snagu. Općenito se sastoji od poprečno

priključenih tiristori upravljivih prigušnica i/ili tiristori uklopivih kondenzatora.

SVG, prema navedenoj širokoj definiciji, zapravo predstavlja izvor jalove snage koji uz odgovarajuće upravljanje može biti pretvoren u bilo koji specifični ili višenamjenski poprečni kompenzator jalove snage. Stoga su SVC i STATCOM zapravo statički var generatori opremljeni odgovarajućim upravljačkim petljama kako bi izlazna jalova snaga bila promjenjiva u skladu sa specifičnim ciljevima kompenzacije.

U općem obliku (slika 18), definira se naprava naziva **Statički var sustav** (eng. *SVS, Static Var System*). Kombinacija različitih statičkih i mehanički uklopivih var kompenzatora s koordiniranim izlaznim veličinama.

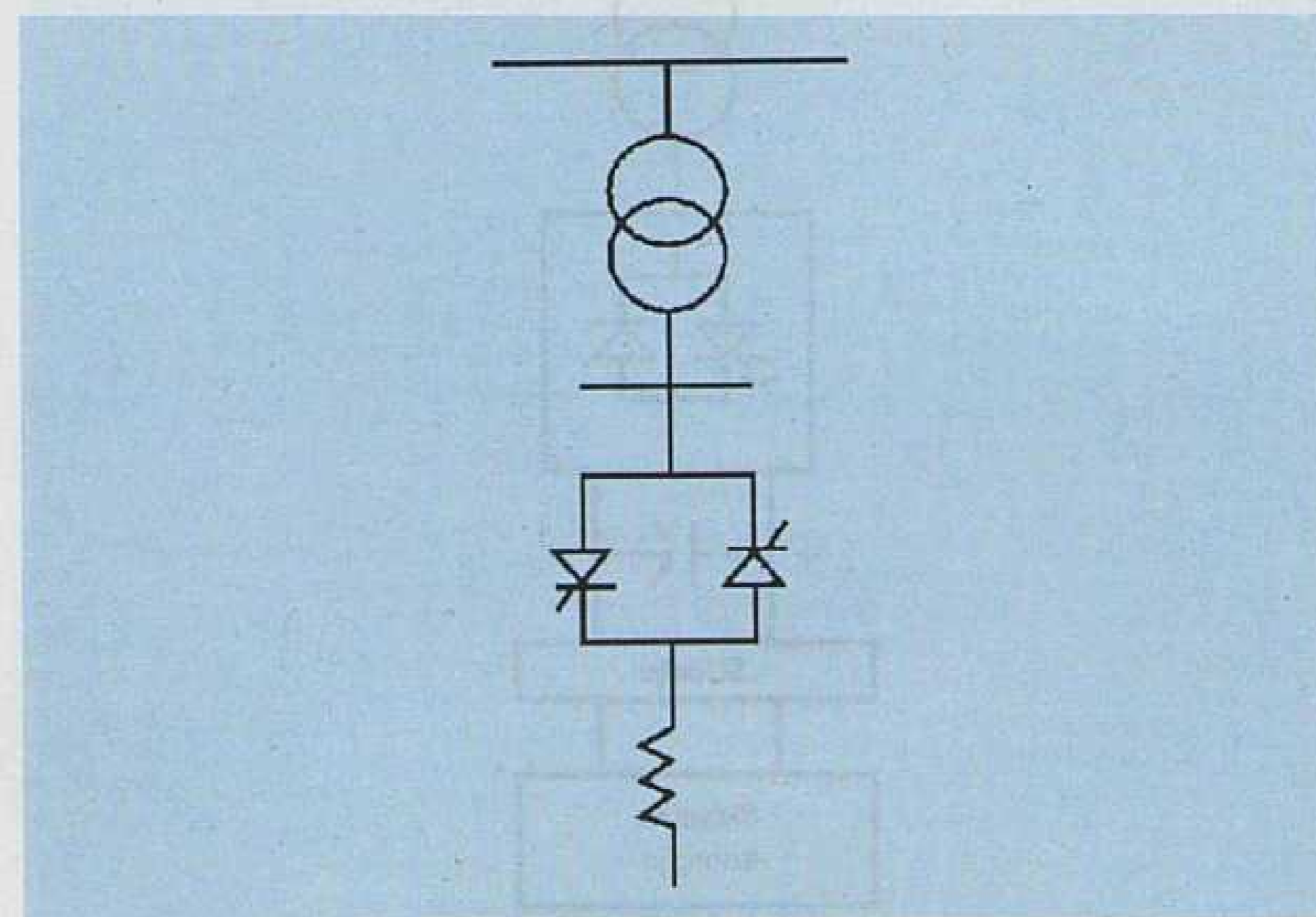


Slika 18. Statički var sustav, SVS

U uvjetima prijelazne stabilnosti, često je od velikog značenja naprava poznata pod nazivom

Tiristoriski upravljivi kočni otpor (eng. *TCBR, Thyristor Controlled Braking Resistor*). Tiristoriski uklopivi otpornik u poprečnom spoju kojim se upravlja radi pomoćne stabilizacije sustava ili minimiziranja ubrzavanja rotora generatora tijekom poremećaja.

TCBR uključuje uklapanje otpornika opremljenog s tiristoriskim prekidačem s regulacijom kuta paljenja na razini perioda (slika 19). Radi snižavanja troškova,



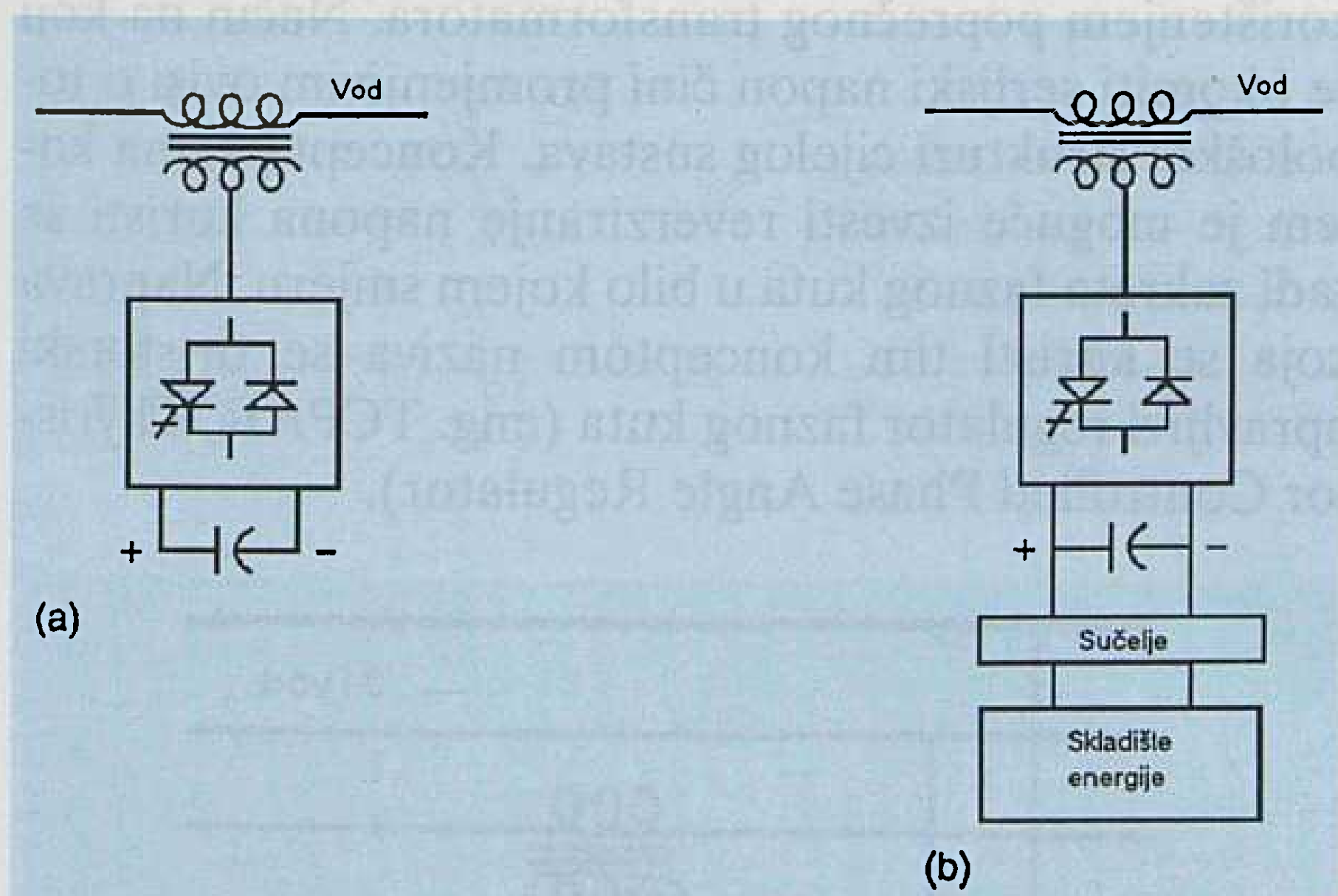
Slika 19. Tiristoriski upravljivi kočni otpor, TCBR

TCBR može biti samo tiristorski uklopiv, odnosno bez regulacije kuta paljenja. Međutim, uz regulaciju kuta paljenja, upravljanje na razini poluperioda primjenjivo je radi selektivnog prigušenja njihovih niske frekvencije.

2. Serijske naprave

Statički sinkroni serijski kompenzator (eng. SSSC, Static Synchronous Series Compensator). Statički sinkroni generator u pogonu kao serijski kompenzator čiji je izlazni napon (neovisno upravljiv) u okomici sa strujom voda ako nije uveden vanjski izvor energije. Time se povećava ili smanjuje jalova komponenta pada napona na vodu i upravlja snagom prijenosa. SSSC može uključivati skladište energije radi poboljšanja prijelaznih pojava u sustavu korištenjem dodatne privremene kompenzacije djelatne snage (trenutna promjena djelatne komponente pada napona na vodu).

SSSC, jedna je od najznačajnijih FACTS naprava. Izvedbom podsjeća na STATCOM, ali injektira izvor napona u serijsku granu (slika 20. a). Može biti zasnovan na pretvaraču s naponskim ili strujnim izvorom. Uobičajeno je serijski injektirani napon prilično malen u usporedbi s linijskim naponom, dok zahtjevi za dozemnom izolacijom mogu biti prilično visoki. Uz odgovarajuću izolaciju između primara i sekundara transformatora, pretvaračka oprema je smještena na zemnom potencijalu ukoliko nije na platformi u stanju potpune izolacije od zemlje. Omjer transformacije se određuje prema kriteriju najekonomičnije izvedbe pretvarača. Bez dodatnog izvora energije, SSSC može injektirati samo promjenjivi napon koji je u okomici sa strujom. Skladište energije može biti priključeno na serijsku napravu kako bi injektirao vektor napona promjenjivog kuta u seriji s vodom (slika 20. b).



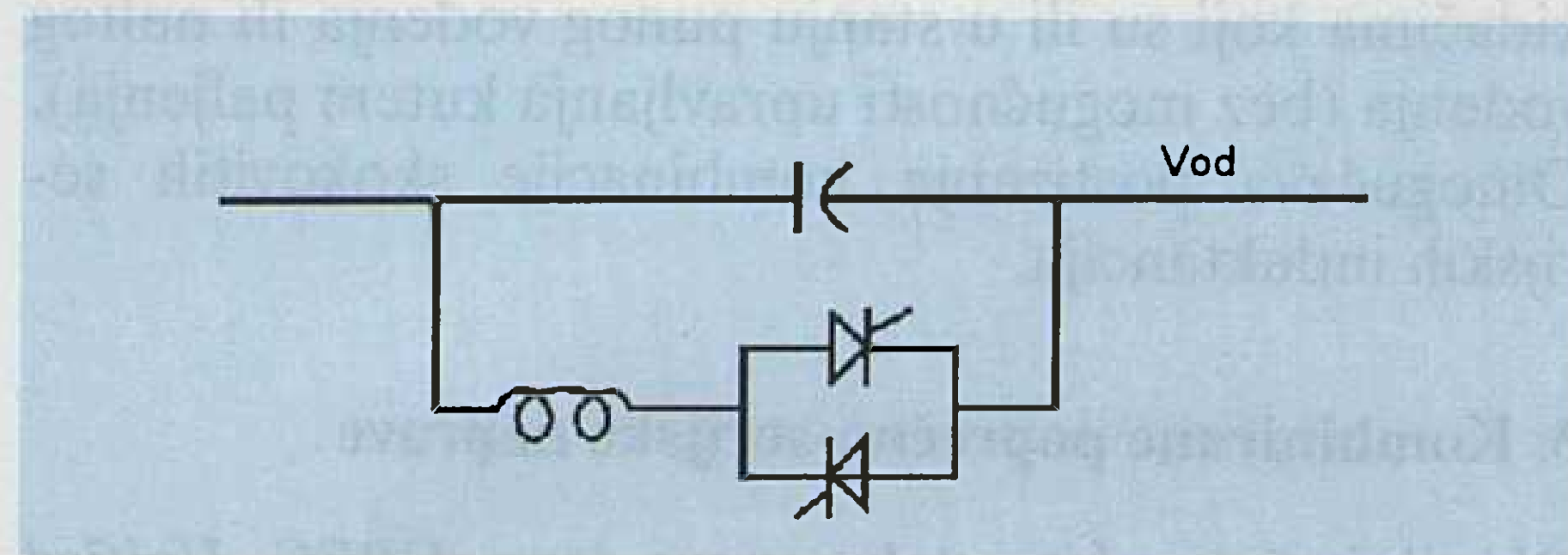
Slika 20. Statički sinkroni serijski kompenzator, SSSC; bez (a) i s (b) dodatnim skladištem energije

Regulator toka snage među vodovima (eng. IPFC, Interline Power Flow Controller). Kombinacija dvaju ili više SSSC-ova priključenih na zajedničku istosmjernu vezu radi omogućavanja dvosmjernog toka djelatne snage između izmjeničnih terminala. SSSC-ovi su upravljani

kako bi omogućili neovisnu kompenzaciju jalove snage, promjenu toka djelatne snage u svakom od vodova te kako bi održavali odabranu raspodjelu toka jalove snage među vodovima. IPFC struktura može također uključivati STATCOM koji se priključuje na IPFC-ovu zajedničku istosmjernu vezu i omogućava poprečnu kompenzaciju jalove snage te razmjenu deficita djelatne snage između kombiniranih SSSC-ova.

Tiristorski upravljivi serijski kondenzator (eng. TCSC, Thyristor Controlled Series Capacitor). Kompenzator s kapacitivnom reaktancijom koji se sastoji od serijske kondenzatorske baterije u paralelnom spoju s tiristorski upravljivom prigušnicom. Omogućava kompenzaciju putem kontinuirano promjenjive ukupne serijske kapacitivne reaktancije.

TCSC je zasnovan na tiristorima bez mogućnosti isključenja signalom na upravljačku elektrodu. Predstavlja alternativu SSSC-u. Prema opisu, promjenjiva prigušnica poput TCR-a priključena je u paraleli sa serijskim kondenzatorom (slika 21). Kada kut paljenja TCR-a postaje 180° , prigušnica je u stanju nulte vodljivosti te serijski kondenzator ima svoju punu impedanciju. Kako kut paljenja opada, kapacitivna impedancija se povećava. S druge strane, kada kut paljenja poprimi vrijednost 90° , prigušnica postaje potpuno vodljiva pa ukupna impedancija postaje induktivna, jer se impedancija prigušnice projektira sa znatno nižim iznosom od impedancije serijskog kondenzatora. Uz kut paljenja u iznosu od 90° , TCSC pomaže u ograničavanju struje kvara. Izvedba TCSC-a može biti u obliku jedne velike jedinice ili više manjih jedinica kako bi se postigla nadmoćnija izvedba.



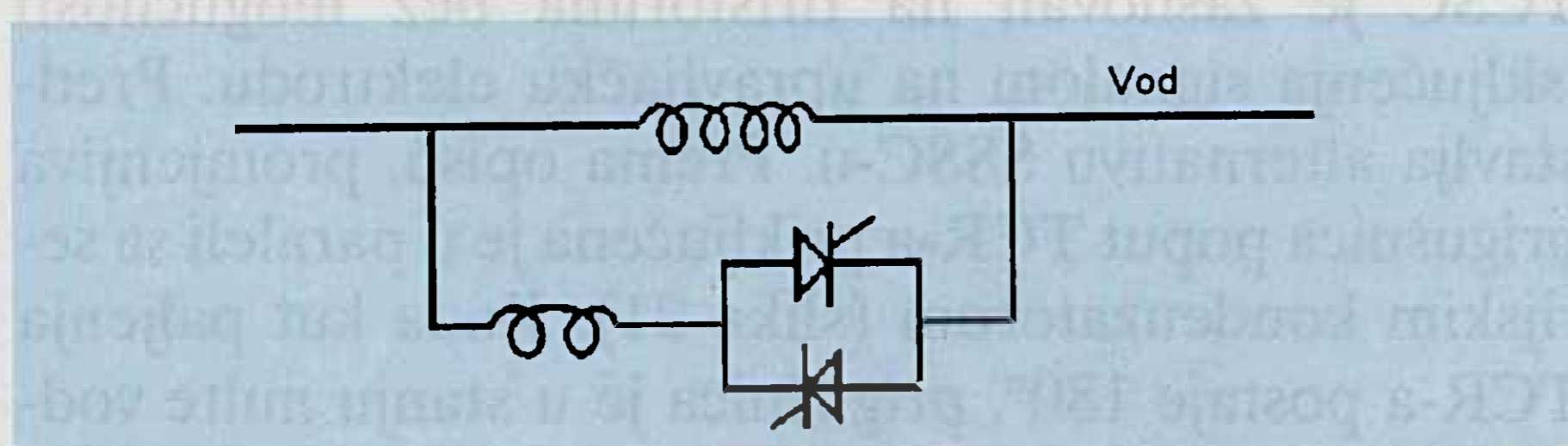
Slika 21. Tiristorski upravljivi serijski kondenzator, TCSC

Tiristorski uklopivi serijski kondenzator (eng. TSSC, Thyristor Switched Series Capacitor). Kompenzator s kapacitivnom reaktancijom koji se sastoji od serijske kondenzatorske baterije u paralelnom spoju s tiristorski uklopivom prigušnicom. Omogućava skokovito upravljanje sa serijskom kapacitivnom reaktancijom.

Umjesto kontinuiranog upravljanja s kapacitivnom impedancijom, u ovom se pristupu prigušnica uklapa samo pri kutu paljenja u iznosu od 90° ili 180° , dakle bez mogućnosti upravljanja s kutem paljenja. Time je moguće smanjiti troškove i gubitke naprave. Često se primjenjuje hibridna varijanta prema kojoj jedan od modula ima tiristorski upravljivi dio, dok su ostali tiristorski uklopivi.

Tiristorski upravljiva serijska prigušnica (eng. *TCSR, Thyristor Controlled Series Reactor*). Kompenzator s induktivnom reaktancijom koji se sastoji od serijske prigušnice u paralelnom spoju s tiristorski upravljivom prigušnicom. Omogućava uvođenje glatko promjenjive serijske induktivne reaktancije.

Kada kut paljenja tiristorski upravljive prigušnice (slika 22) poprimi iznos od 180° , prestaje stanje vodenja pa neupravljiva prigušnica djeluje kao limiter struje kvara. Kako se kut smanjuje, ukupna induktivna reaktancija opada sve dok kut ne poprimi iznos od 90° , kada postaje jednaka iznosu reaktancije paralelne kombinacije dviju prigušnica. Kao i TCSC, TCSR u izvedbi je s jednom velikom jedinicom ili nekoliko manjih serijskih jedinica.



Slika 22. Tiristorski upravljiva serijska prigušnica, TCSR

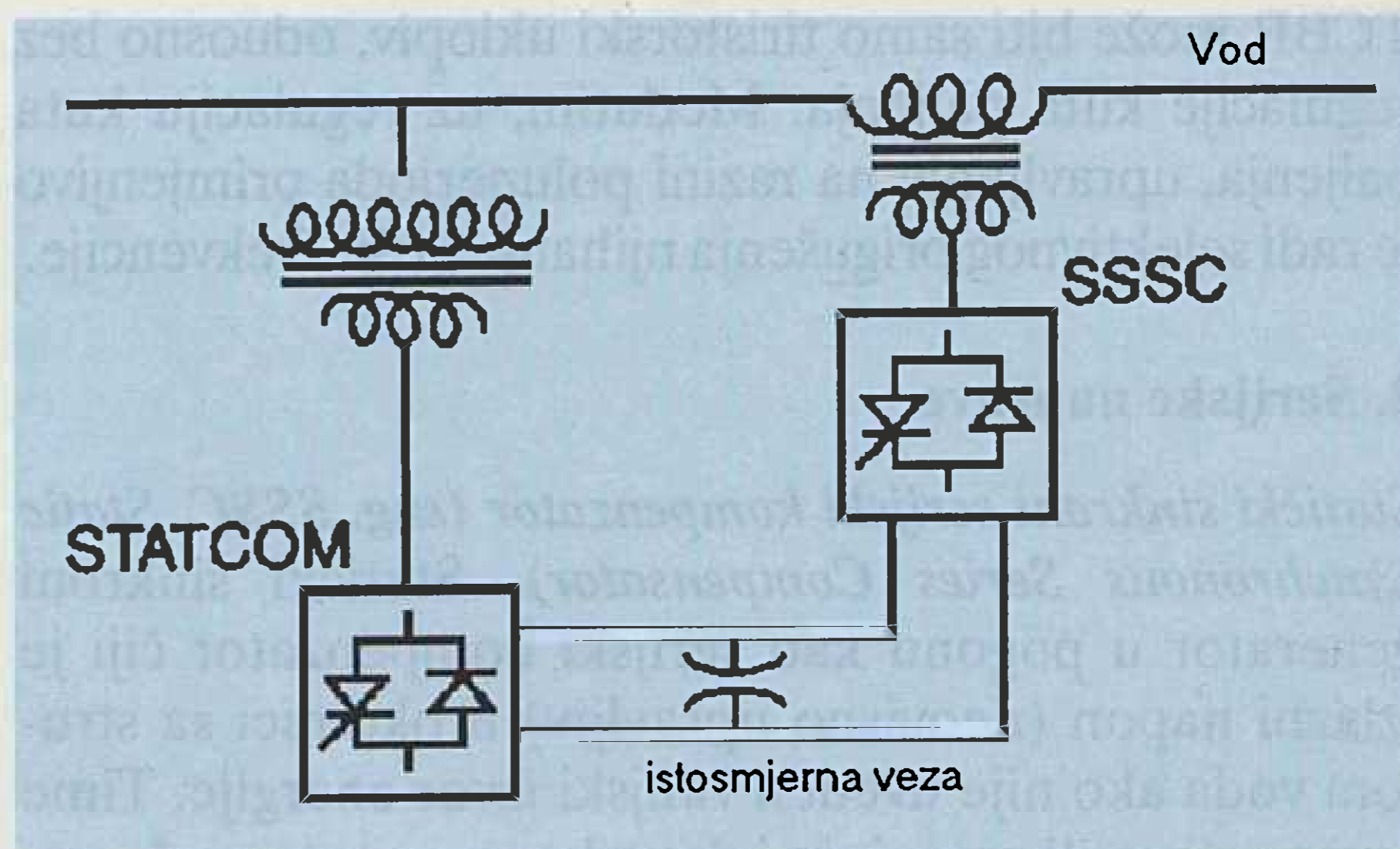
Tiristorski uklopiva serijska prigušnica (eng. *TSSR, Thyristor Switched Series Reactor*). Kompenzator s induktivnom reaktancijom koji se sastoji od serijske prigušnice u paralelnom spoju s tiristorski uklopivom prigušnicom. Omogućava skokovito upravljanje sa serijskom induktivnom reaktancijom.

Ova naprava je podvrsta TCSR-a, ali s tiristorskim prekidačima koji su ili u stanju punog vodenja ili nultog vodenja (bez mogućnosti upravljanja kutem paljenja). Omogućava postizanje kombinacije skokovitih serijskih induktancija.

3. Kombinirane poprečno-serijske naprave

Objedinjeni regulator toka snage (eng. *UPFC, Unified Power Flow Controller*). Kombinacija statičkog sinkronog kompenzatora (STATCOM) i statičkog serijskog kompenzatora (SSSC) koji su spojeni putem zajedničke istosmjerne veze kako bi omogućili dvosmjerni tok djelatne snage između izlaznog terminala serijskog SSSC-a i izlaznog terminala poprečnog STATCOM-a.

Upravljanje ovom napravom (slika 23) omogućava izvođenje kompenzacije djelatne i jalove komponente serijske impedancije bez vanjskog izvora električne energije. UPFC, putem injektiranja serijskog izvora napona koji nije kutno ograničen, omogućava upravljanje (istodobno ili selektivno) naponom čvorišta prijenosnog voda, impedancijom i kutem. Alternativno, moguće je upravljanje tokovima djelatne i jalove snage voda. UPFC također omogućava izvođenje neovisne poprečne kompenzacije jalove snage.

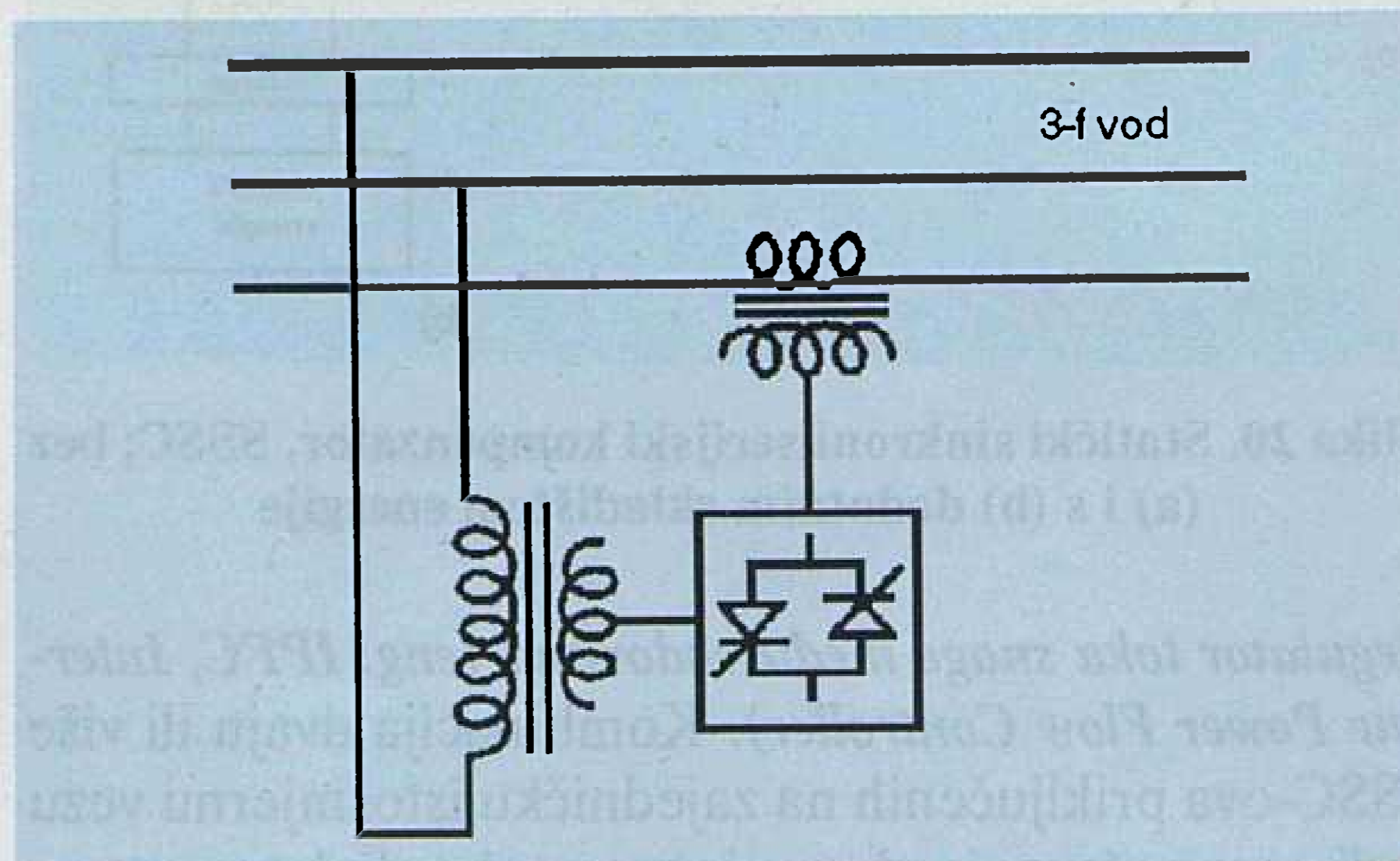


Slika 23. Objedinjeni regulator toka snage, UPFC

Kod UPFC-a, djelatnu snagu koja je potrebna serijskoj jedinici (SSSC) dobavlja poprečna jedinica (STATCOM) iz voda putem zajedničke istosmjerne veze. Poprečna jedinica se istodobno može koristiti za regulaciju napona u čvorištu priključka razmjennom jalove snage sa sustavom. Dodavanjem skladišta energije poput supravodljivog magneta, u krug zajedničke istosmjerne veze posredstvom elektroničkog sučelja, nadalje se poboljšava učinkovitost UPFC-a. Upravljiva razmjena djelatne snage s vanjskim izvorom, poput skladišta, znatno je učinkovitije pri upravljanju dinamikom sustava u usporedbi s modulacijom transfera snage unutar sustava.

Tiristorski upravljivi zakretni transformator (eng. *TCPST, Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer*). Zakretni transformator koji korištenjem tiristorskih prekidača omogućava brze promjene faznog kuta.

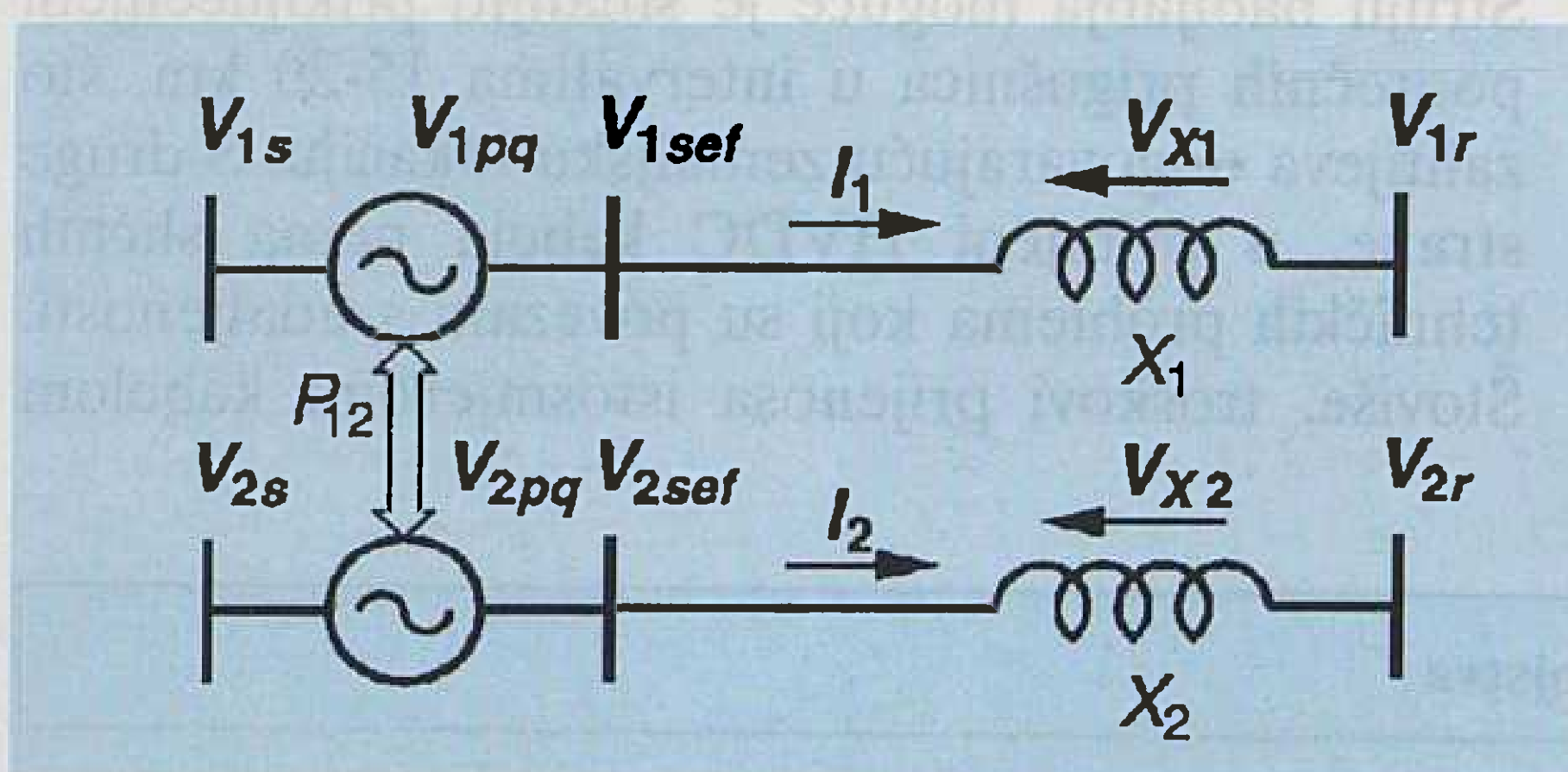
Općenito uzevši, zakretni transformator se zasniva na dodavanju okomitog vektora napona u seriju s fazom (slika 24). Vektor napona se izvodi iz drugih dviju faza korištenjem poprečnog transformatora. Način na koji se okomiti serijski napon čini promjenjivim ovisi o topološkoj strukturi cijelog sustava. Koncept prema kojem je moguće izvesti reverziranje napona koristi se radi zakreta faznog kuta u bilo kojem smjeru. Naprava koja se koristi tim konceptom naziva se tiristorski upravljivi regulator faznog kuta (eng. *TCPAR, Thyristor Controlled Phase Angle Regulator*).



Slika 24. Tiristorski upravljivi zakretni transformator, TCPST

Međufazni regulator snage (eng. IPC, Interphase Power Controller). Serijska naprava pomoću koje se upravlja djelatnom i jalovom snagom. Sastoji se, u svakoj fazi, od induktivne i kapacitivne grane koje su priključene na međusobno odvojene i fazno zakrenute napone.

Djelatna i jalova snaga mogu se neovisno definirati prilagodbom faznog zakreta i/ili impedancija grana uz korištenje mehaničkih ili elektroničkih prekidača (slika 25). U slučaju da induktivna i kapacitivna impedancija rezultiraju konjugiranim parom, svaki od terminala IPC-a predstavlja pasivni izvor struje ovisan o naponu na drugom terminalu. Ovo je primjer široko definirano koncepta serijske naprave koji može biti projektiran tako da omogući upravljanje djelatnom i jalovom snagom.



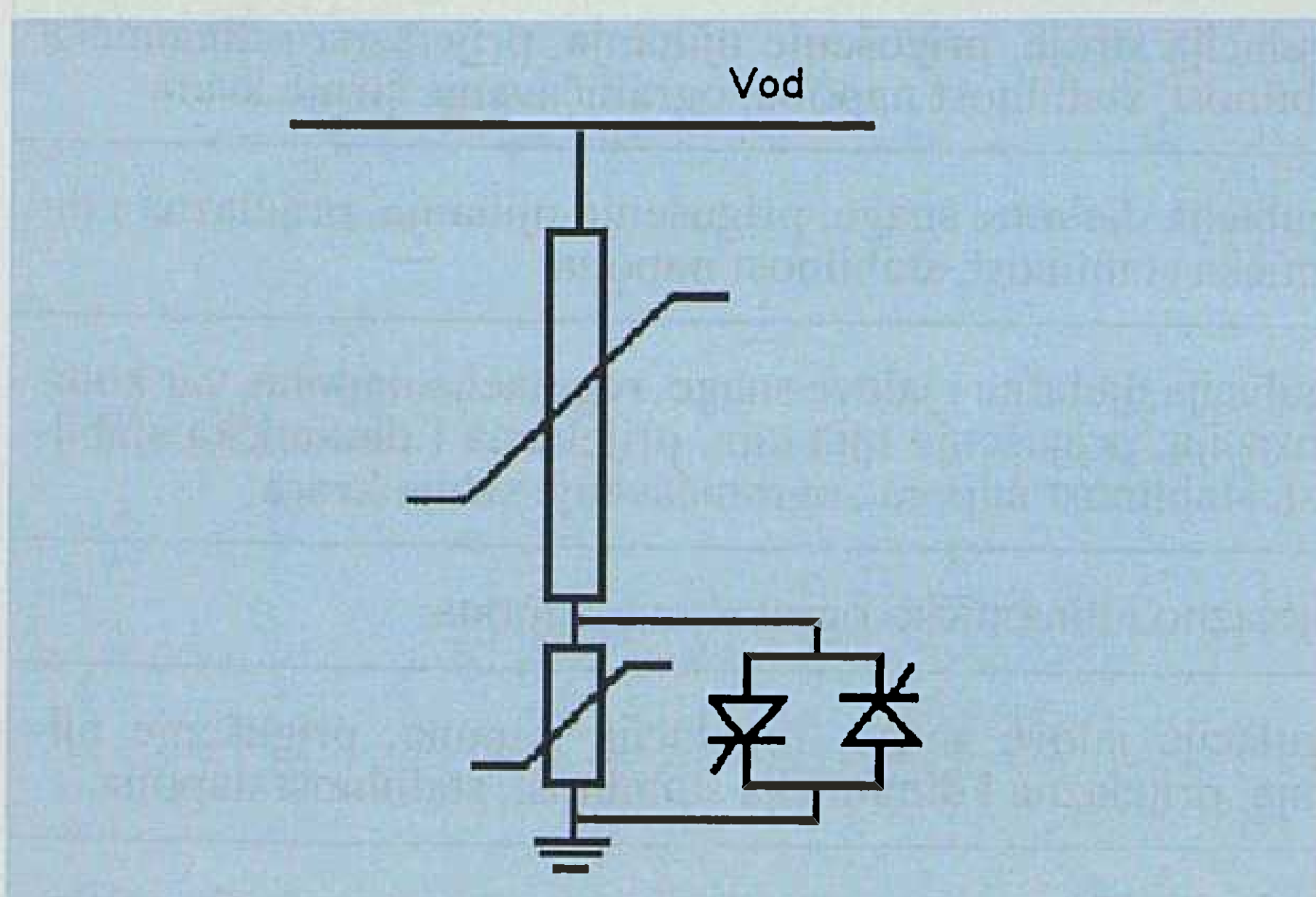
Slika 25. Međufazni regulator snage, IPC

4. Ostale naprave

Od preostalih FACTS naprava neophodno je istaknuti slijedeće

Tiristorski upravljivi limiter napona (eng. TCVL, Thyristor Controlled Voltage Limiter). Tiristorski uklopivi metal-oksidni varistor (MOV) koji se koristi radi ograničavanja napona na krajevima priključenja tijekom prijelaznih pojava.

Tiristorski prekidač može biti spojen u seriju s odvodnikom prenapona (bez raspore) ili dio odvodnika prenapona (10-20%) može biti premošten s tiristorskim prekidačem (slika 26). U potonjem se slučaju dinamički snižava razina ograničenja napona.

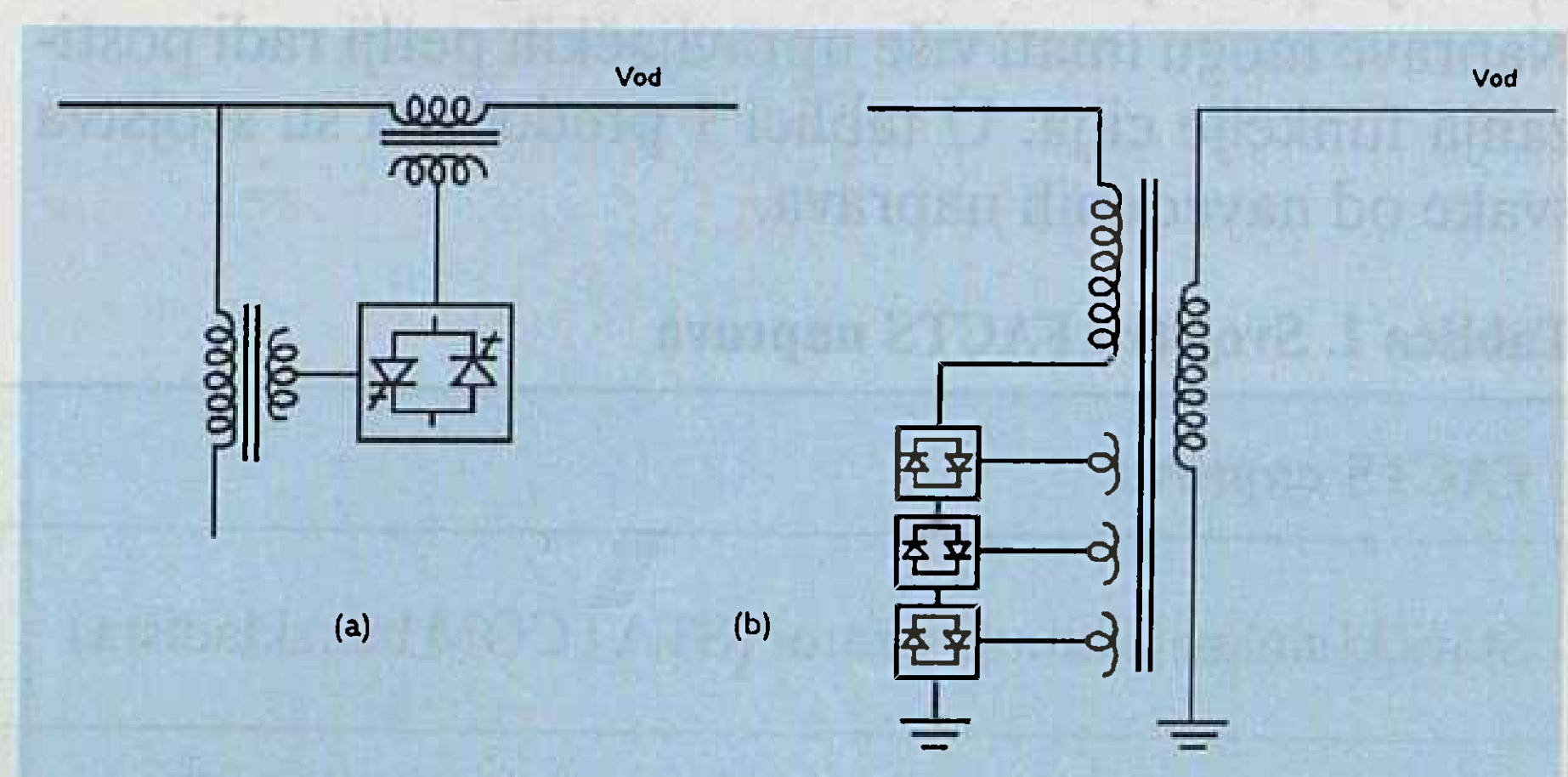


Slika 26. Tiristorski upravljivi limiter napona, TCVL

Općenito uzevši, MOV treba biti znatno moćniji od normalnog odvodnika prenapona bez raspore, kako bi TCVL mogao potisnuti dinamičke prenapone, a koji bi u protivnom trajali nekoliko desetaka perioda.

Tiristorski upravljivi regulator napona (eng. TCVR, Thyristor Controlled Voltage Regulator). Tiristorski upravljivi transformator koji rezultira kontinuirano upravljivim promjenjivim naponom (istog faznog kuta).

U praktičnim primjenama, naprava može biti u izvedbi s tiristorski upravljivim ac/ac naponskim pretvaračem kojim se injektira promjenjivi izmjenični napon istog faznog kuta u seriju s vodom (slika 27. a) ili kao običan transformator s tiristorski upravljivim prijenosnim omjerom (slika 27. b). Navedene relativno ekonomične naprave mogu biti vrlo učinkovite u upravljanju tokom jalove snage između dva izmjenična sustava.



Slika 27. Tiristorski upravljivi regulator napona, TCVR; (a) izvedba s naponskim pretvaračem i (b) transformatorska izvedba

Nakon prethodno provedene diskusije o različitim FACTS napravama, značajno je napomenuti da u okviru osnovnih zahtjeva sigurnosti navedene naprave omogućavaju postizanje jednog ili više slijedećih doprinosa:

- Upravljanje tokovima snage prema postavljenim zahtjevima. Zahtjevi se mogu odnositi na ugovore, vlastite potrebe elektroprivrede, postizanje optimalnih tokova snage, ponašanje u poremećenim stanjima ...
- Povećanje opteretivosti vodova do termičkih i dielektričkih ograničenja. Postiže se prevladavanjem drugih ograničenja te raspodjelom tokova snage među vodovima prema njihovim mogućnostima prijenosa. Značajno je napomenuti da je termičko ograničenje voda vrlo promjenjivo i ovisi o uvjetima okoliša i prošlim opterećenjima.
- Povećanje sigurnosti sustava putem podizanja granice prijelazne stabilnosti, ograničavanjem struje kratkog spoja i preopterećenja, izbjegavanjem kaskadnih raspada sustava i prigušivanjem elektromehaničkog njihanja u sustavu.
- Omogućavanje sigurnog povezivanja spojnim vodom susjednih sustava i područja, čime se smanjuje potreba za ukupnom rezervom proizvodnje na obje strane.

- Omogućavanje veće prilagodljivosti u planiranju novih proizvodnih izvora.
- Pojačavanje postojećih vodova.
- Smanjivanje tokova jalove snage čime se omogućava prijenos većeg iznosa djelatne snage.
- Smanjivanje zamkastih tokova snage.
- Povećanje iskoristivosti proizvodnih izvora s najnižim troškovima. Jedan od osnovnih razloga povezivanja prijenosnog sustava jest korištenje proizvodnih izvora s najmanjim troškovima. U slučaju kada to nije moguće postići, uglavnom se zaključuje da ne postoji dovoljno prijenosne moći. Poboljšanje prijenosne moći stoga bi omogućilo povećanje iskoristivosti najjeftinije proizvodnje.

S obzirom da su napon, struja, impedancija, djelatna i jalova snaga međusobno vrlo ovisne veličine, svaka od navedenih naprava ima višestruka svojstva u upravljanju naponom, tokovima snage ili stabilnosti. Naprave mogu imati više upravljačkih petlji radi postizanja funkcije cilja. U tablici 1 predočena su svojstva svake od navedenih naprava.

Tablica 1. Svojstva FACTS naprava

FACTS naprava	Svojstva
Statički sinkroni kompenzator (STATCOM bez skladišta)	regulacija napona, var kompenzacija, prigušenje njihanja, stabilnost napona
Statički sinkroni kompenzator (STATCOM sa skladištem, BESS, SMES, veliki dc kondenzator)	regulacija napona, var kompenzacija, prigušenje njihanja, prijelazna i dinamička stabilnost, stabilnost napona, AGC
Statički var kompenzator (SVC, TCR, TSC, TSR)	regulacija napona, var kompenzacija, prigušenje njihanja, prijelazna i dinamička stabilnost, stabilnost napona
Tiristorski upravljivi kočni otpor (TCBR)	prigušenje njihanja, prijelazna i dinamička stabilnost
Statički sinkroni serijski kompenzator (SSSC bez skladišta)	regulacija struje, prigušenje njihanja, prijelazna i dinamička stabilnost, stabilnost napona, ograničavanje struje kvara
Statički sinkroni serijski kompenzator (SSSC sa skladištem)	regulacija struje, prigušenje njihanja, prijelazna i dinamička stabilnost, stabilnost napona
Tiristorski upravljivi serijski kondenzator (TCSC, TSSC)	regulacija struje, prigušenje njihanja, prijelazna i dinamička stabilnost, stabilnost napona, ograničavanje struje kvara
Tiristorski upravljiva serijska prigušnica (TCSR, TSSR)	regulacija struje, prigušenje njihanja, prijelazna i dinamička stabilnost, stabilnost napona, ograničavanje struje kvara
Tiristorski upravljivi zakretni transformator (TCPST ili TCPR)	regulacija djelatne snage, prigušenje njihanja, prijelazna i dinamička stabilnost, stabilnost napona
Objedinjeni regulator toka snage (UPFC)	regulacija djelatne i jalove snage, regulacija napona, var kompenzacija, prigušenje njihanja, prijelazna i dinamička stabilnost, stabilnost napona, ograničavanje struje kvara
Tiristorski upravljivi limiter napona (TCVL)	prijelazno i dinamičko ograničenje napona
Tiristorski upravljivi regulator napona (TCVR)	regulacija jalove snage, regulacija napona, prigušenje njihanja, prijelazna i dinamička stabilnost, stabilnost napona
Regulator toka snage među vodovima (IPFC)	regulacija jalove snage, regulacija napona, prigušenje oscilacija, prijelazna i dinamička stabilnost, stabilnost napona

Značajno je napomenuti da su HVDC i FACTS vrlo komplementarne tehnologije. HVDC u osnovi ne predstavlja mrežu za sebe već moguću vezu između izmjeničnih sustava, gdje bi pouzdana izmjenična veza bila preskupa.

Danas postoji više od 50 HVDC projekata u svijetu koji se dijele u slijedeće kategorije:

- **Podmorski kabeli.** Izmjenični kabeli imaju visoku poprečnu kapacitanciju radi čega zahtijevaju veliku struju nabijanja (jalova snaga), koja je za red veličine veća nego kod nadzemnih vodova. U općenitom slučaju, za duljine podmorskih kabela veće od 30 km, struja nabijanja kabela poprima takav iznos da dovodi do njegovog punog opterećenja čime se ne ostavlja niti malo mjesta za prijenos djelatne snage. Struju nabijanja moguće je smanjiti priključenjem poprečnih prigušnica u intervalima 15-20 km, što zahtijeva odgovarajuću zemaljsku lokaciju. S druge strane, u primjeni HVDC kabela nema sličnih tehničkih problema koji su povezani s udaljenosti. Štoviše, troškovi prijenosa istosmjernim kabelom

znatno su niži od izmjeničnog. Time HVDC dobiva prednost u primjeni kod podmorskog prijenosa na većim udaljenostima. U tom području, FACTS tehnologija (posebice UPFC) omogućava poboljšanje putem regulacije napona na jednom od krajeva tako da ga izjednačava s naponom na drugom kraju. Time efektivna duljina kabela sa stajališta struje nabijanja može biti i prepolovljena. Ovim se pristupom postiže ekonomično rješenje na srednjim duljinama podmorskog prijenosa (do 100 km), ali za veće udaljenosti HVDC prijenos je nezamjenjiv.

- **Nadzemni prijenos na velikim udaljenostima.** U slučaju nadzemnog prijenosa na velikim udaljenostima (red veličine 1000 km), ušteda u kapitalnim troškovima i gubicima kod primjene HVDC-a može biti dovoljna za otplatu dva pretvarača (energetska elektronika kod HVDC-a čini 200% od nazivne snage prijenosa). Ta udaljenost naziva se prekretnom udaljenosti. Na nju utječe veliki broj faktora, od ekonomskih (troškovi izgradnje) do administrativnih (dozvole za gradnju). Značajno je prepoznati da FACTS naprave i u ovom slučaju mogu imati istaknutu primjenu, iako ne utječu u većoj mjeri na prekretnu udaljenost. FACTS naprave imaju ulogu u potpori izmjeničnog prijenosa, gdje HVDC nije ekonomski isplativ.
- **Podzemni prijenos.** S obzirom na visoke troškove podzemnih kabela, prekretna udaljenost u ovom slučaju primjene HVDC-a iznosi približno 100 km, dakle znatno manje nego kod nadzemnog prijenosa (1000 km). FACTS tehnologija niti u ovom slučaju ne utječe na značajniju promjenu prekretnu udaljenosti. Do danas nema projekata podzemnog prijenosa na velikim udaljenostima, (izmjeničnih i istosmjernih) budući da je nadzemni prijenos znatno jeftiniji (približno 4 puta, a u nekim slučajevima i više).
- **Povezivanje izmjeničnih sustava s različitom ili nekompatibilnom frekvencijom.** Dvije su osnovne grupe frekvencije; 50 i 60 Hz. Područja s frekvencijom od 60 Hz nalaze se u obje Amerike, osim u Argentini i Paragvaju. Te dvije zemlje i preostali dio svijeta imaju frekvenciju od 50 Hz. Japan ima obje frekvencije. Budući da su oceani preveliki i preduboki, tržište za ovaj oblik primjene HVDC-a vrlo je ograničeno. Znatno veći opseg primjene moguće je očekivati u povezivanju izmjeničnih sustava koji nemaju kompatibilne sustave regulacije frekvencije. U tim se slučajevima fazni kut između dva sustava često zarotira u punom krugu ili u većem dijelu kruga. Ako učestalost tog događaja iznosi samo jednom ili dva puta na dan (kut iznad 60°), mehanički zakretni transformatori više se ne smatraju prihvatljivim rješenjem. Mnogi HVDC projekti (eng. back-to-back) rješavaju taj problem. Također, postoje i mnoge lokacije u svijetu gdje je sustav regulacije frekvencije kompatibilan, ali radi velike udaljenosti

točke priključka od središta inercije sustava nastaju velike promjene faznog kuta tijekom dnevnih promjena opterećenja. FACTS tehnologija može također biti dio rješenja ovog problema. Dovoljno je napravu koja ima mogućnost upravljanja faznim kutem postaviti u jednom čvorištu i regulirati tako da u cijelom krugu prati promjene kuta na drugom kraju.

Veliko potencijalno tržište na kojem je moguća primjena FACTS naprava najčešće se pronalazi unutar izmjeničnih sustava gdje su:

- postojeći stacionarni fazni kutevi između čvorišta unutar razmjerno normalnih okvira,
- troškovi FACTS naprave niži od troškova HVDC-a i
- zahtijevana dimenzioniranja FACTS naprava manja od nazivne opteretivosti prijenosne veze.

5. PRIMJERI PRIMJENE FACTS NAPRAVA

Početak primjene naprava zasnovanih na energetske elektronici bilježi se prije 20-ak godina. Naime, statički var kompenzator (SVC) primijenjen je po prvi put 1974. godine u Nebraski, USA (General Electric). Već slijedeće godine druga primjena zabilježena je u Minnesoti, USA (Westinghouse). Prva primjena serijske naprave (NGH-SSR, upravljanje impedancijom serijskog kondenzatora u svrhu prigušenja) bilježi se 1984. godine u Californiji, USA (Siemens). Čak i prije pojave SVC-a, postojale su dvije izvedbe statičke prigušnice sa zasićenjem za ograničavanje prenapona. Prve primjene naprava uzrokovale su veliki broj daljnjih istraživanja i ukazale na postojanje potencijalnih mogućnosti korištenja. Od tada je u primjeni FACTS tehnologije, koja je pod tim nazivom poznata od početka 1990-ih godina, došlo do brzog razvitka. Na kraju ovog rada, priložena je tablica s popisom primijenjenih naprava u EES-ima širom svijeta od 1990. godine. Pored primjena u prijenosnom i distribucijskom sektoru, uočava se postojanje većeg broja industrijskih primjena (željezare, lučne peći, valjaonice) te primjena u željeznici.

U primjeni u prijenosnom sektoru, ističu se četiri instalacije za koje se procjenjuje da će imati najveći utjecaj na daljnji razvoj FACTS tehnologije:

- **TCSC lociran u Kayenti, Arizona, USA (WAPA).** Proizvođačev naziv za ovu napravu je ASC (eng. Advanced Series Capacitor, Siemens) i odnosi se na sustav za serijsku kompenzaciju koji u sebi uključuje TCSC i konvencionalni serijski kondenzator. Instaliran je u 230 kV-nom sustavu u svrhu povećanja prijenosne moći. Nalazi se u sredini voda ukupne duljine 300 km. Okolni sustav uglavnom se sastoji od 500 kV i 230 kV vodova u području s većim brojem velikih termoenergetskih izvora. U početku je predmetni 230 kV vod korišten za prijenos cca 300 MW, ali je kasnijom izgradnjom paralelnih 500 kV vodova njegovu značenje značajno umanjeno. Zatim je, primje-

nom zakretnog transformatora, prvobitna uloga voda ponovno uspostavljena. Na kraju je primjenom sustava za serijsku kompenzaciju (70%, 110 U, 330 Mvar), prijenosna moc dodatno povećana za 100 MW (ukupno 400 MW), čime se približila termičkom ograničenju.

- **TCSC lociran u Slattu, Oregon, USA (BPA).** Naprava je instalirana na 500 kV naponskoj razini u seriji s vodom. Na udaljenosti od 25 km nalazi se velika termoelektrana na ugljen. S obzirom da je ovo jedna od prvih primjena ove vrste, lokacija na kojoj je naprava instalirana nije izabrana da prvenstveno poveća prijenosnu moć, već da izloži napravu ozbiljnim pogonskim uvjetima radi prikupljanja stvarnih iskustava i ponašanja. Postavljeni ciljevi odnose se na proizvodnju višemodulskog TCSC-a, njegovo testiranje i stalni pogon. Uz to što je naprava primijenjena na do tada najvišem naponu (500 kV), lokacija ima vrlo visoku struju kratkog spoja (20.3 kA), a i u neposrednoj blizini nalazi se termoelektrana. Time je projekt korišten i radi razmatranja i izbjegavanja subsinkrone rezonancije.
- **STATCOM lociran u Sullivanu, Tennessee, USA (TVA).** Naprava je namijenjena kompenzaciji jalove snage. Postrojenje se napaja s 500 kV i 161 kV naponske razine, između kojih je 1200 MVA transformator. Na strani 500 kV razine, česta su stanja povišenog napona tijekom malih opterećenja. Na strani 161 kV razine, česta su stanja sniženog napona tijekom vršnih opterećenja. Lokacija je vrlo rijetka s obzirom na pojavu promjenjivog napona tako da je moguće koristiti cijeli simetrični raspon izlazne snage kompenzatora (od induktivne do kapacitivne) bez primjene fiksnih kondenzatora ili prigušnica. Lokacija ujedno pruža mogućnost razmatranja prigušenja elektromehaničkog njihanja s obzirom na blizinu spoja sa susjednim elektroprivrednim sustavom (TVA-AEP). STATCOM je namijenjen regulaciji napona na 161 kV razini tijekom dnevnog podizanja opterećenja tako da se promjena prijenosnog omjera transformatora koristi znatno rjeđe. Korištenjem STATCOM-a očekuje se znatno produženje vijeka trajanja transformatora. Alternativno rješenje umjesto izgradnje STATCOM-a nužno bi uključivalo instalaciju drugog transformatora ili konstrukciju još jednog 161 kV voda. Izgradnjom STATCOM-a navedeni veliki troškovi izbjegnuti su na više godina.
- **UPFC lociran u Inezu, Kentucky, USA (AEP).** Prvi UPFC u svijetu, ukupne snage ± 320 MVA, u pogonu je od 1998. godine. Zadaća mu je regulirati napon i upravljati tokovima snage u mreži naponske razine 138 kV. Šira okolina lokacije primjene naprave ima snagu opterećenja u iznosu od 2000 MW. Snaga se prenosi dugačkim 138 kV vodovima. Napon i jalova snaga održavaju se korištenjem SVC-a nazivne snage ± 125 Mvar te većeg broja poprečnih

kondenzatorskih baterija. S obzirom da šire područje ovisi o dugačkim 138 kV vodovima koji u normalnom pogonu prenose i po 300 MVA, postoji vrlo malena margina sigurnosti u uvjetima ispada elemenata mreže. Štoviše, razina napona vrlo je niska i iznosi 95% od nazivne. Ispadi vodova uzrokuju sniženi napon i/ili preopterećenje preostalih vodova. Kao rješenje nametnula se izgradnja teškog 138 kV voda s visokim termičkim ograničenjem koje se približava termičkom ograničenju normalnog 345 kV voda. Međutim, teškim vodom se neće prenositi snaga samo zbog visoke margine njegove termičke opteretivosti, već će snagu prijenosa određivati impedancije i ostali parametri mreže. U postupku vrednovanja opcija, zaključeno je da kombinirana serijsko-poprečna naprava poput UPFC-a može zadovoljiti postavljene zahtjeve upravljanja tokovima snage kroz teški vod i regulacije napona u čvorištu.

6. USPOREDBA TROŠKOVA INSTALACIJE

U fazi planiranja kompenzacije jalove snage nužno je potrebno držati se slijedećih preporuka:

- najprije primijeniti mehanički uklopivu poprečnu kompenzaciju s niskim troškovima, a zatim u distribuciji kompenzirati blizu jediničnog faktora snage, na visokom naponu kompenzirati mrežu čiji su vodovi opterećeni iznad prirodne snage, izbjeći transfer jalove snage između različitih naponskih razina, razmotriti lokacije primjene transformatora s promjenjivim prijenosnim omjerom pod opterećenjem, te na kraju razmotriti primjenu naprednijih naprava zasnovanih na energetskej elektronici,
- razmotriti primjenu serijske kompenzacije na dužim vodovima najprije s mehanički uklopivim serijskim kondenzatorima, a zatim i s TCSC ili SSSC (pogotovo ako postoji mogućnost nastanka subsinkrone rezonancije),
- analizirati karakteristike tereta za potrebe primjene SVC-a i STATCOM-a,
- u preliminarnim analizama koristiti V-Q i P-V metode proračuna najvećih opterećenja i radnih točki,
- koristiti simulaciju u vremenskoj domeni za konačnu analizu i koordinaciju upravljanja, i
- kod događaja s ekstremno niskom vjerojatnosti nastanka, razmotriti mjere rasterećenja (podnaponsko i/ili podfrekvencijsko rasterećenje).

Troškovi su svakako jedan od razloga navedenog niza preporuka. Predvidivi troškovi dobave i instalacije opreme u postojećem postrojenju (od strane BPA) iznose:

- 500 kV serijski kondenzator, \$3.0 mil + \$14.4/kvar,
- 500 kV poprečni kondenzator, \$1.4 mil + \$5.3/kvar,
- 230 kV poprečni kondenzator, \$0.3 mil + \$5.4/kvar,
- 500 kV poprečna prigušnica, \$1.7 mil + \$10.4/kvar.

Raspon troškova suvremenih naprava predviđa se prema slijedećim poznatim troškovima:

- troškovi SVC-a, koji se sastoji od 100 Mvar TSR i 3 x 100 Mvar TSC, iznose \$31/kvar (iz 1990. godine),
- troškovi SVC-a snage ± 350 Mvar (2 x TCR i 2 x TSC) iznose \$35/kvar (podatak iz 1993. godine),
- troškovi STATCOM-a iznose \$50/kvar,
- troškovi TCSC-a iznose \$40/kvar (slično kao SVC),
- troškovi serijske grane UPFC-a iznose \$50/kW,
- troškovi poprečne grane UPFC-a iznose \$50/kvar (jednako kao kod STATCOM-a), i
- troškovi sinkronog kompenzatora (Manitoba Hydro) nazivne snage +300(360)/-165 Mvar iznose \$50/kvar.

Navedene troškove različitih kompenzacijskih uređaja moguće je usporediti s troškovima izgradnje visokonaponskog prijenosnog voda nazivnog napona 400 kV i duljine 100 km. Uz kamatnu stopu od 8% i očekivani životni vijek od 30 godina, predvidivi troškovi (ovisni i o izboru trase) iznose:

- troškovi investicije \$30 mil + gubici \$30/MWh.

7. PRIMJENJIVOST KOMPENZACIJSKIH UREĐAJA U EES-u HRVATSKE S OBZIROM NA NAPONSKE PRILIKE U DALMACIJI

S obzirom na naponske prilike u Dalmaciji [25, 26], gdje postoje problemi s povišenim naponom na razinama 400 kV i 220 kV, ozbiljno se razmišlja o primjeni kompenzacijskog uređaja veličine izgradnje 100 - 150 Mvar na nekoj od odgovarajućih lokacija (Obrovac, Konjsko). Problem povišenih napona u Dalmaciji razmotren je isključivo sa stajališta slabog opterećenja prijenosnih vodova. S obzirom da je u budućnosti moguće očekivati i povećanje prijenosa snage tim vodovima (globalni transfer istok-zapad), problem povišenog napona može se transformirati i u problem stabilnosti napona (sniženi napon). Prema navedenim radovima nije uočena potreba preusmjeravanja tokova snage na različitim vodovima, odnosno različitim naponskim razinama.

Na temelju pregleda postojećih FACTS naprava, moguće je prepoznati poprečne naprave s izrazitim doprinosom u rješavanju problema regulacije napona (tablica 1). Među njima se posebice ističu STATCOM, SVC, TCR, TSC i TSR. Učinkovit bi bio SVS sustav koji uz navedene naprave uključuje i konvencionalne MSC i MSR (slika 18). U slučaju postojanja problema s tokovima snage koji bi pored regulacije napona zahtijevao i njezino preusmjeravanje, u razmatranje bi ušle kombinirane poprečno-serijske naprave poput UPFC i IPFC.

Problem stabilnosti napona iznimno je specifičan. Njegovo rješavanje zahtijeva poznavanje velikog broja scenarija razvoja i nastanka sloma napona. Mjere sprječavanja vrlo su raznolike. U području kompenzacije, pored poprečnih naprava u njegovom izbje-

vanju moguće je koristiti i serijske naprave SSSC, TCSC, TSSC, TCSR, TSSR i TSPST, a stoga i već spomenute kombinirane poprečno-serijske naprave UPFC i IPFC.

8. ZAKLJUČAK

FACTS naprave, zasnovane na energetskej elektronici, nude mogućnost poboljšanja upravljivosti i stabilnosti, čime uvelike utječu na povećanje prijenosne moći izmjeničnog prijenosnog sustava. Pojedinačno ili kombinirano djelovanje FACTS naprava usmjereno je prema:

- prigušenju elektromehaničkih oscilacija,
- regulaciji tokova djelatnih i jalovih snaga,
- serijskoj i poprečnoj kompenzaciji te
- regulaciji kuta prijenosa.

Na temelju ovisnosti o specifičnim potrebama održavanja sigurnog pogona na problematičnim lokacijama u visokonaponskoj prijenosnoj mreži, moguće je prepoznati određenu vrstu FACTS naprave čijim bi se korištenjem eventualni problemi ublažili, odnosno u potpunosti uklonili. Jasno, zbog visokih troškova (čije se sniženje očekuje daljnjim razvojem tehnologije), prethodno je potrebno iscrpiti sve mogućnosti konvencionalnog rješavanja postavljenog problema.

LITERATURA

- [1] P. KUNDUR: "Power system stability and control", EPRI McGraw-Hill, ISBN 0-07-035958-X, 1994
- [2] C. TAYLOR: "Power system voltage stability", EPRI McGraw-Hill, ISBN 0-07-063184-0, 1994
- [3] T. Van CUTSEM, C. VOURNAS: "Voltage stability of electric power systems", Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-7923-8139-4, 1998
- [4] C. TAYLOR: "Reactive power compensation and voltage stability: removing transmission limitations", Seminar Book, February 1997
- [5] EES-UETP Course, *Stability and control of power networks*, Electric Power Systems, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, June 1993
- [6] CIGR TF 39.02, "Voltage and reactive control," *LECTRA*, no. 173, August 1997, pp. 115-141
- [7] CIGR TF 38-01-03, *Planning against voltage collapse*, Report, 1986
- [8] CIGR TF 38-02-10, *Modelling of voltage collapse including dynamic phenomena*, Report, 1993
- [9] IEEE, *Voltage stability of power systems: concepts analytical tools, and industry experience*, IEEE catalogue number 90TH0358-2-PWR, 1990
- [10] IEEE, *Suggested techniques for voltage stability analysis*, IEEE, no. 93TH0620-5 PWR, 1993
- [11] CIGR TF 11 WG38.02, *Indices predicting voltage collapse including dynamic phenomena*, Report, 1994
- [12] CIGR TF 34-08, *Protection against voltage collapse*, Report, 1998

- [13] CIGR WG 39.04, "Coordination of protective relays and controls of generating sets under abnormal voltage conditions on the network," *Proc. of the CIGR Symposium*, 3A-03, Montreal, Canada, 1991
- [14] IEEE, *System protection and voltage stability*, Report, ISBN 0-7803-9981-1, June 1993
- [15] CIGR TF 38-02-12, *Criteria and countermeasures for voltage collapse*, Report, 1995
- [16] IEEE WG K12, *Voltage collapse mitigation*, Draft 4.0, IEEE Power System Relaying Committee, 1996
- [17] CIGR TF 38-01-07, *Analysis and control of power system oscillations*, Report, 1996
- [18] N. HINGORANI, L. GYUGYI: "Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems", IEEE Press, ISBN 0-7803-3455-8, 2000
- [19] CIGR TF 38.01.06, *Load flow control in high voltage power systems using FACTS controllers*, Report, 1996
- [20] L. GYUGYI: "Solid-state synchronous voltage sources for dynamic compensation and real-time control of AC transmission lines", IEEE Emerging Practices in Technology, IEEE Standards Press, 1993
- [21] IEEE FACTS Terms & Definition Task Force, "Proposed terms and definitions for flexible AC transmission system (FACTS)," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 12, no. 4, October 1997, pp. 1848-1853
- [22] IEEE Power Electronics Modeling Task Force & Digital Simulation Working Group, "Guidelines for modeling power electronics in electric power engineering applications," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 12, no. 1, January 1997, pp. 505-514
- [23] IEEE, *FACTS Application*, IEEE catalogue number 96TP116-0, 1996
- [24] CIGR TF 38-01-08, *Modeling of power electronics equipment (FACTS) in load flow and stability programs: a representation guide for power system planning and analysis*, Report 145, 1999
- [25] M. LOVRIĆ, R. GOIĆ: "Problemi i mogući načini rješavanja naponskih prilika u prijenosnoj mreži Dalmacije", *Energija*, god. 49, br. 3, 2000, str. 171-176
- [26] M. MAJSTROVIĆ, D. BAJŠ, G. MAJSTROVIĆ: "Kompenzacija reaktivne snage u prijenosnoj mreži na području Dalmacije", *Energija*, god. 49, br. 3, 2000, str. 177-182

PRILOG

Popis praktičnih primjena FACTS naprava od 1990. godine (SVC instalacije su navedene samo za veličinu izgradnje veću od 100 Mvar).

Skraćenice:

TCR	- Thyristor Controlled Reactor
TCT	- Thyristor Controlled Transformer
SR	- Saturable Reactor
FC	- Fixed Capacitor
TSC	- Thyristor Switched Capacitor
MSC	- Mechanical Switched Capacitor
BSC	- Breaker Switched Reactor
MSR	- Mechanical Switched Reactor
STATCOM	- Static Synchronous Compensator
TSSC	- Thyristor Switched Series Compensator
TCSC	- Thyristor Controlled Series Compensator
UPFC	- Unified Power Flow Controller
TCBR	- Thyristor Controlled Braking Resistor
IPC	- Interphase Power Controller

TCPST	- Thyristor Cntl Phase Shifting Transformer
VC	- Voltage Control
FC	- Frequency Control
DS	- Dynamic Stability
UL	- Compensation of Unsymmetrical Loading
FRL	- Comp. of Fast Reactive Load Variations
VL	- Voltage Unbalances
SS	- System Voltage Stability
PC	- Power Oscillation Control
DSSR	- Damping of Gen. Subsynch. Resonance
PFC	- Power Flow Control
DT	- Demonstrate Technology
HDS	- Hardware Design Studies
SCL	- Short Circuit Limiter
Arc Furn	- (eng. Arc Furnace) lučna peć
Roll. Mill	- (eng. Rolling Mill) metalna industrija
Tract. Load	- (eng. Traction Load) pružno opterećenje
Valve Test	- testiranje tiristorskih ventila
Developing Concept	- razvojne smjernice

Br.	Zemlja	God	Vlasnik	Mjesto	Vrsta	Korištenje	Napon sust.	Napon priklj.	Puls	Mvar	Proizv.
1	Bulgaria	1990	Kremikovtzy	Sofia	TCR	Arc Furn	35kV, 50Hz			110	
2	USA	1990	Keystone Steel & Wire	Peoria	TCR	Arc Furn	34kV, 60Hz			165	
3	China	1991	Tianjin Seamless	Tianjin	TCR	Arc Furn	34kV, 50Hz			120	
4	China	1991	Wuyang Steelworks	Wuyang	TCR	Arc Furn	35kV, 50Hz			100	
5	Germany	1991	Stadtwerke	Bremen	TCR	Roll. Mill	33kV, 50Hz			110	
6	S. Korea	1991	Kang Won Industries	Pohang	TCR	Arc Furn	22kV, 60Hz			115	
7	Turkey	1991	Cucurova IIA	Izmir	TCR	Arc Furn	35kV, 50Hz			110	
8	Turkey	1991	Cucurova IIB	Izmir	TCR	Arc Furn	35kV, 50Hz			110	
9	Italy	1992	Ferdofin	Brescia	TCR	Arc Furn	16kV, 50Hz			110	
10	Malaysia	1992	Antara Steel Pasir	Gudang	TCR	Arc Furn	33kV, 50Hz			110	
11	Thailand	1992	NTS Steel Groups	Chonburi	TCR	Arc Furn	22kV, 60Hz			110	
12	USA	1992	Nucor	Blytheville, Ar	TCR	DC-ArcFurn	34kV, 60Hz			195	
13	Iran	1994	NISCO	YAZD	TCR	Arc Furn	33kV, 50Hz			115	
14	South Africa	1994	Columbus Joint Venture	Middelburg	TCR	Arc Furn	33kV, 50Hz			165	
15	Turkey	1994	ICDAS	Istanbul II	TCR	Arc Furn	35kV, 50Hz			105	
16	S. Korea	1996	Posco Stainless	Posco	TCR	Arc Furn	22kV, 60Hz			120	
17	Brazil	1990	Electronorte	Coxipo	TCR+TSC		230kV, 60Hz			130	ABB
18	Canada	1990	Hydro-Quebec	Chamouchouane I	TCR+TSC	VC+DS+SS	735kV, 60Hz	16kV	6	-145 to 300	ABB
19	Canada	1990	Hydro-Quebec	Chamouchouane II	TCR+TSC	VC+DS+SS	735kV, 60Hz	16kV	6	-145 to 300	ABB
20	USA	1990	Maine Electric Pwr.	Chester	TCR+TSC		345kV, 60Hz				ABB
21	Malaysia	1991	NEB	KI North 1			275kV, 50 Hz			200	
22	Malaysia	1991	NEB	KI North 2			275kV, 50Hz			200	
23	Malaysia	1991	NEB	Yong Peng			275kV, 50Hz			200	
24	India	1992	NTPC	Kanpur 1			400kV, 50Hz			280	
25	India	1992	NTPC	Kanpur 2			400kV, 50Hz			280	
26	USA	1992	AEA	Soldatna			115kV, 60Hz			110	
27	Canada	1993	B.C. Hydro	Dunsmuir			132kV, 60Hz			300	
28	Norway	1993	Statnett	Syiling			400kV, 50Hz			320	

Br.	Zemlja	God	Vlasnik	Mjesto	Vrsta	Korištenje	Napon sust.	Napon priklj.	Puls	Mvar	Proizv.
29	USA	1993	BPA	Keeler			230kV, 60Hz			650	
30	USA	1993	BPA	Maple Valley			230kV, 60Hz			650	
31	USA	1994	North States Power	Forbes			500kV, 60Hz			800	
32	Canada	1995	HQ	Chamouchouane I			735kV, 60Hz			220	
33	Canada	1995	HQ	Chamouchouane II			735kV, 60Hz			220	
34	Norway	1995	Statnett	Kristiansand			300kV, 50Hz			400	
35	Thailand	1995	EGAT	Bang Saphan			230kV, 60Hz			350	
36	Zimbabwe	1995	ZESA	Insukamini			330kV, 50Hz			300	
37	Canada	1996	HQ	La Verendrye I			735kV, 60Hz			220	
38	Canada	1996	HQ	La Verendrye II			735kV, 60Hz			220	
39	USA	1996	LANL	Los Alamos			115kV, 60Hz			150	
40	Canada	1997	HQ	Chibougama I			735kV, 60Hz			220	
41	Canada	1997	HQ	Chibougama II			735kV, 60Hz			220	
42	Germany	1995	PSAG	Salzgitter	TCR+FC	FRL	30kV, 50Hz	30kV	6	0 to 110	AEG
43	USA	1992	Appalachian Power	Roanoke Steel	TCR+FC	FRL Arc Furn	34.5kV	34.5kV	6	-42 to 169	Cegelec /CANA
44	UK	1992	Transmanche Link	Folkstone	TCR+FC	UL Tract Load	132kV, 50Hz	26.3kV	6	-126 to 174	Cegelec /CANA
45	USA	1995	AEP	Steel Dynamics	TCR+FC	FRL Arc Furn	34.5kV	34.5kV	6	0 to 250	Cegelec /CANA
46	USA	1995	AEP	Steel Dynamics	TCR+FC	FRL Roll.Mill	34.5kV	34.5kV	6	5 to 175	Cegelec /CANA
47	USA	1996	Centerior Energy	North Star /BHP	TCR+FC	FRL Arc Furn	34.5kV	34.5kV	6	0 to 150	Cegelec /CANA
48	Mexico	1998	CFE	Hylsa, Monterrey	TCR+FC	FLR Arc Furn	34.5	34.5	6	-50 to 100	Cegelec /CANA
49	Zaire	1990	SNEL	Kirvenza	TCR+TSC+FC	VC	220kV, 60Hz	10.5kV	6	130	Cogelex Alsthom
50	U.K.	1990	CEGB	Exeter	TCR+TSC+FC	VC+SS	400kV, 50Hz	400kV	6	-75 to 150	GEC
51	Japan	1991	Kansai Bilet Center		TCR+FC	FRL	77kV	33kV	6	0.1735	Fuji Electric
52	Thailand	1994	Siam Yamato Steel		TCR+FC	FRL	115kV	22kV	6	8 to 108	Fuji Electric
53	Japan	1995	Tokyo Steel	Utsunomia	TCR+FC	FRL+SS	154kV	33kV	6	24 to 119	Fuji Electric
54	Japan	1995	Tokyo Steel	Utsunomia	TCR+FC	FRL+SS	154kV	33kV	6	24 to 119	Fuji Electric
55	U.K.	1996	CEGB	Ninfield	SR+FC+MSC	VC+SS	400kV, 50Hz	56.6kV	18	-150 to 150	GEC

Br.	Zemlja	God	Vlasnik	Mjesto	Vrsta	Korištenje	Napon sust.	Napon priklj.	Puls	Mvar	Proizv.
56	U.K.	1991	National Grid Co.	St. John's Wood I	TCR+TSC+FC	VC+SS	275kV, 50Hz	275kV	6	-106 to 150	GEC Alsthom
57	U.K.	1992	National Grid Co.	St. John's Wood II	TCR+TSC+FC	VC+SS	275kV, 50Hz	275kV	6	-106 to 150	GEC Alsthom
58	U.K.	1990	National Grid Co.	Exeter 3	TCR+TSC+FC	SS+VC	400kV, 50Hz	400kV	6	-0.5	GEC Alsthom
59	U.K.	1991	National Grid Co.	Lovedean	TCR+TSC+FC	SS+VC	400kV, 50Hz	400kV	6	-0.5	GEC Alsthom
60	U.K.	1992	National Grid Co.	Exeter 5	TCR+TSC+FC	SS+VC	400kV, 50Hz	400kV	6	-0.5	GEC Alsthom
61	U.K.	1992	National Grid Co.	Mannington	TCR+TSC+FC	SS+VC	400kV, 50Hz	400kV	6	-0.5	GEC Alsthom
62	U.K.	1993	National Grid Co.	Mannington	TCR+TSC+FC	SS+VC	400kV, 50Hz	400kV	6	-0.5	GEC Alsthom
63	U.K.	1994	National Grid Co.	Cellarhead	TCR+TSC+FC	SS+VC	400kV, 50Hz	7.9kV	6	-0.5	GEC Alsthom
64	USA	1994	WAPA	Watertown	TCR+FC+MSR+MSC	SS+VC	230kV, 60Hz	20 kV	6	-0.75	GEC Alsthom
65	U.K.	1995	National Grid Co.	Cellarhead	TCR+TSC+FC	SS+VC	400kV, 50Hz	7.9kV	6	-0.5	GEC Alsthom
66	U.K.	1995	National Grid Co.	Willington	TCR+TSC+FC	SS+VC	400kV, 50Hz	7.9kV	6	-0.5	GEC Alsthom
67	Japan	1990	Chubu Steel Co.	Nagoya Steel Works	INVERTER	FRL	22kV, 60Hz	1.0kV	36	-1	Mitsubishi
68	Japan	1991	Kansai Electric Pwr.	Inuyama SW/S	INVERTER	DS+VU+SS+PC	154kV, 60Hz	2.0 kV	48	-1	Mitsubishi
69	Japan	1993	Central Japan Rlwy.	Shin-Biwajima	INVERTER	VC+UL+VU	77kV, 60Hz	2.0 kV	18	-1	Mitsubishi
70	Japan	1993	Central Japan Rlwy	Shin-Biwajima	INVERTER	VC+UL+VU	77kV, 60Hz	2.0 kV	18	-1	Mitsubishi
71	Japan	1994	Mitsubishi Steel Co.	Muroran Steel	INVERTER	FRL	22kV, 50Hz	2.0 kV	18	-1	Mitsubishi
72	Japan	1994	Central Japan Rlwy	Shimizu	INVERTER	VC+UL+VU	154kV, 50Hz	2.0 kV	18	-1	Mitsubishi
73	Japan	1994	Central Japan Rlwy	Shimizu	INVERTER	VC+UL+VU	154kV, 50Hz	2.0 kV	18	-1	Mitsubishi
74	Japan	1994	Central Japan Rlwy	Shimizu	INVERTER	VC+UL+VU	154kV, 50Hz	2.0 kV	18	-1	Mitsubishi
75	Japan	1995	Central Japan Rlwy	Shin-Biwajima	INVERTER	VC+UL+VU	77kV, 60Hz	2.0 kV	18	-1	Mitsubishi
76	Japan	1995	Chubu Steel Co.	Nagoya Steel Works	INVERTER	FRL	22kV, 60Hz	2.0kV	24	-1	Mitsubishi
77	Japan	1995	Sumitomo Steel Co.	Osaka Steel Works	INVERTER	FRL	22kV, 60Hz	1.2kV	24	-1	Mitsubishi
78	Brazil	1993	Eletronote, Brazil	Sao Luis	TCR+TSR	VC	500kV, 50Hz	20kV	6	-140 to 200	Siemens
79	Brazil	1993	Eletronote, Brazil	Sao Luis	TCR+TSR	VC	500kV, 50Hz	20kV	6	-140 to 200	Siemens
80	U.K.	1991	CEGB, U.K.	Pelham	TCR+TSC	VC	400kV, 50Hz	14kV	6	-80 to 150	Siemens
81	U.K.	1991	CEGB, U.K.	Pelham	TCR+TSC	VC	400kV, 50Hz	14kV	6	-80 to 150	Siemens

Br.	Zemlja	God	Vlasnik	Mjesto	Vrsta	Korištenje	Napon sust.	Napon priklj.	Puls	Mvar	Proizv.
82	U.S.A.	1992	SPS, Amarillo, Tx,	Eddy County	TCR+TSC	VC+SS	230kV	8.5kV	6	-54 to 144	Siemens
83	Saudi Arabia	1992	Voest Alpine for Saudi I&S Co.	HADEED Al Jubail	TCR	VC+FRL	34.5kV	34.5kV	6	-50 to 110	Siemens
84	Indonesia	1992	P.T. Krakatau Steel	Kota Baja	TCR	VC+FRL	30kV, 50 Hz	30kV	6	-65 to 115	Siemens
85	U.K.	1993	National Grid Co.	Harker	TCR+TSC	VC+PC	275kV, 50Hz	14kV	6	-80 to 150	Siemens
86	U.K.	1993	National Grid Co.	Harker	TCR+TSC	VC+PC	275kV, 50Hz	14kV	6	-80 to 150	Siemens
87	U.K.	1993	National Grid Co.	Drakelow	TCR+TSC	VC	275kV, 50Hz	14kV	6	-80 to 150	Siemens
88	U.K.	1994	National Grid Co.	Feckenham	TCR+TSC	VC	275kV, 50Hz	14 kV	6	-80 to 150	Siemens
89	Luxembourg	1994	Arbed Schiffingen	Arbed Schiffingen	TCR	VC+FRL	33kV, 50Hz	33kV	6	-40 to 150	Siemens
90	India	1994	ESSAR	ESSAR	TCR	VC+FRL	33kV	33kV	6	0 to 150	Siemens
91	India	1994	ESSAR	ESSAR	TCR	VC+FRL	33kV	33kV	6	0 to 150	Siemens
92	Turkey	1994	EGE-METAL	EGE-METAL	TCR	VC+FRL	34.5kV	34.5kV	6	0 to 125	Siemens
93	South Africa	1994	ESKOM	Impala	TCR	VC	275kV, 50Hz	15kV	6	-50 to 100	Siemens
94	South Africa	1994	ESKOM	Illovo	TCR	VC	275kV, 50Hz	15kV	6	-50 to 100	Siemens
95	South Africa	1995	ESKOM	Athene	TCR	VC	400kV, 50Hz	15kV	6	-50 to 100	Siemens
96	Belgium	1994	Marcinelle	Arc Furnace	TCR	VC+FRL	30kV	30kV	6	-10 to 120	Siemens
97	U.S.A.	1994	Gallatin Steel	Ft. Mitchell, Ky	TCR	VC+FRL	34.5kV	34.5kV	6	0 to 150	Siemens
98	U.S.A.	1995	L. A. Dept. Water&Pwr.	Adelanto	TSC	VC+PC+DS	500kV	16kV	6	388	Siemens
99	U.S.A.	1995	L.A. Dept. Water&Pwr.	Marketplace	TSC	VC+PC+DS	500kV	16kV	6	388	Siemens
100	India	1995	ESSAR	DC-Arc Furnace	TCR	VC+FRL	33kV	33kV	6	0 to 150	Siemens
101	Japan	1990	Japan Railway	Tokai Iwabuchi	TCR	VC	154kV, 60Hz			0 to 120	Toshiba
102	Japan	1990	Nisshin Seikou	Sinnannyou Works	STATCOM	FRL	22kV			-20 to 20	Toshiba
103	Japan	1991	Chiyoda Koute	Tokyo Works	STATCOM	FRL	22kV			-15 to 15	Toshiba
104	Brazil	1991	Energ. de Minas Gerais	Ouro Preto 2	TCR	VC	138kV, 60Hz			0 to 100	Toshiba
105	Japan	1991	Tokyo Electric Pwr.	Shin Shinano	STATCOM	PC	66kV, 50Hz	525 kV		-50 to 50	Toshiba
106	Japan	1991	Tokyo Seitetsu	Okayana Works	STATCOM	FRL	33kV			-49.5 to 49.5	Toshiba
107	Japan	1992	Hokkaido Electric Pwr.	Teine	STATCOM	FRL	66kV, 50Hz			-20 to 20	Toshiba

Br.	Zemlja	God	Vlasnik	Mjesto	Vrsta	Korištenje	Napon sust.	Napon priklj.	Puls	Mvar	Proizv.
108	Austria	1992	ETZ, AG	Durnrohr	TCR	VC	400kV, 50Hz			-150 to 0	Toshiba
109	Japan	1992	Tokyo Steel Co.	Okayama	TCR	FRL	110kV, 60Hz			0 to 191	Toshiba
110	U.A.E.	1992	Water & Electr. Dept.	Al Ain	TCR	VC	220kV, 50Hz			-80 to 180	Toshiba
111	Japan	1993	Japan Railway	Sintakatsuka	STATCOM	VC	154kV			-48 to 48	Toshiba
112	Japan	1994	Daidou Tokushukou	Shibukawa Works	STATCOM	FRL	22kV			-16.5 to 16.5	Toshiba
113	Japan	1994	Mukoyama Koujyou	Mukoyama Works	STATCOM	FRL	22kV			-22 to 22	Toshiba
114	Japan	1995	Daidou Tokushukou	Chita Works	STATCOM	VC	22kV			-27 to 27	Toshiba
115	Japan	1995	Nihon Kinzoku	Kinuura Works	STATCOM	FRL	22kV			-18 to 18	Toshiba
116	USA	1996	Tennessee Valley Authority	Sullivan, Tn	INVERTER-STATCOM	VC+DT	161kV, 60Hz	6.6kV DC	48	-100 to 100	Westinghouse
117	USA	1997	Structural Metals	Seguin, Tx	INVERTER-STATCOM	FRL	15kV, 60Hz	10.4kV DC	48	-80 to 80	Westinghouse
118	USA	1997	American Electric Power	Inez, Ky	INVERTER-UPFC (Shunt)	Shunt part of UPFC	138kV, 60Hz	20.9kV DC	48	-160 to 160	Westinghouse
119	USA	1998	American Electric Power	Inez, Ky	INVERTER-UPFC (Series)	Series part of UPFC, & PFC+PC+HDS	138kV, 60Hz	20.9kV DC	48	-160 to 160	Westinghouse
120	USA	1998	Pacific Gas & Electric	Paul Sweet	INVERTER-STATCOM	VC	115kV, 60Hz	10.2kV DC	24	-20 to 60	Westinghouse
121	USA	1991	American Electric Power	Kanawha River	TSSC	Valve Test	345kV				ABB
122	USA	1992	WAPA	Kayenta, Az	TCSC - Single Module	PFC +DT				15ohm, 1kA, 16.2kV	Siemens
123	USA	1993	BPA	Slatt, Or	TCSC - Six Module	PFC+PC +DSSR +DT	500kV			8ohm, 2kA, 26.7kV	General Electric
124	USA	1993	WAPA		TCPST	Developing Concept +PC					General Electric
125	USA	1994	Minnesota Power & Light	North Dakota Coal Fields	TCBR	Stability Studies	230kV			100-500 MW	
126	France	1997	EdF		UPFC	PFC +HDS	225kV			-7 to 7	GE/GEC Alstom
127	Canada	1996	Hydro Quebec		IPC	PFC +SCL	161kV			200	CITEQ /ABB

TRANSMISSION POWER INCREASE POSSIBILITIES FOR ELECTRIC POWER SYSTEM USING CONVENTIONAL AND FACTS EQUIPMENT

The influence of the FACTS equipment on transmission power increase is described. In problem solving, both static and dynamic aspects of voltage stability, voltage regulation and reactive power compensation are used. The electric power system during longer transient states with lower voltage security using the FACTS equipment of different operation has been examined. The possibilities of the FACTS equipment considering load boundaries of the transmission system are also described. Apart from a short description and equipment defining, application examples are also included. The characteristics and costs of the conventional and the FACTS equipment are compared.

nungs-Stabilität und -Regelung, sowie der Blindleistungskompensation genutzt. In einer Übersicht ist das Stromversorgungssystem umfasst worden, und zwar für die Fälle längerer Zeitspannen vom niedrigen Stand der Spannungssicherheit, verschiedene FACTS Einrichtungen inbegriffen. Beschrieben sind die Möglichkeiten der Anwendung von FACTS Einrichtungen im Bezug auf die Belastbarkeitsgrenzen des Übertragungssystems. Neben der kurzen Beschreibung und Bestimmung der Geräte sind Beispiele ihrer praktischen Anwendung angeführt. Ein Vergleich der Eigenschaften und der Kosten herkömmlicher und anpassungsfähiger (FACTS) Geräte ist durchgeführt worden.

STEIGERUNG DER ÜBERTRAGUNGSKAPAZITÄT DES STROMVERSORGUNGSSYSTEMS DURCH NUTZUNG HERKÖMMLICHER UND ANPASSUNGSFÄHIGER EINRICHTUNGEN

Beschrieben sind die Fragen des Einflusses von sog. FACTS-Einrichtungen (= Flexible Alternating Current Transmission System = Elastisches Wechselstromübertragungssystem) auf die Steigerung der Übertragungskapazität. Dabei wurden statische und dynamische Gesichtspunkte der Lösungen von Fragen der Span-

Naslov pisca:

**Mr. sc. Nijaz Dizdarević, dipl. ing.
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Unska 3, 10000 Zagreb, Hrvatska**

Uredništvo primilo rukopis:
2001-01-19.