



Dinamika i regulacija elektroenergetskog sustava

Prof.dr.sc. Sejid Tešnjak

Doc.dr.sc. Igor Kuzle

FACTS uređaji

Potreba za jalovom snagom u prijenosu

- Povećanjem opterećenja prijenosnih elemenata naponi u sustavu počinju opadati zbog gubitaka. Ukoliko je opterećenje sustava maleno naponi rastu iznad dozvoljenih granica.
- Da bi se naponi održavali u željenim ograničenjima potrebno je proizvoditi ili trošiti jalovu snagu u sustavu.

Izvori jalove snage

Izvori jalove snage mogu biti **statički** i **dinamički**.

Statički izvori ne mogu upravljati izlaznom jalovom snagom u uvjetima promjene napona u čvorištu u kojem su priključeni na EES.

Kondenzatorske baterije i prigušnice statički proizvode i troše jalovu snagu.

Dinamički izvori upravljaju izlaznom jalovom snagom u uvjetima promjene napona u čvorištu u kojem su priključeni na EES.

Sinkroni generatori, sinkroni kompenzatori i FACTS uređaji su dinamički izvori jalove snage.

Kondenzatorske baterije

Tijekom visokih opterećenja sustava uključuju se paralelno priključene kondenzatorske baterije za pružanje naponske podrške injehtiranjem jalove snage u sustav.

Paralelno priključene kondenzatorske baterije imaju vrlo male gubitke djelatne snage i vrlo su pouzdane u radu.

Troškovi održavanja njihovog održavanja su maleni.

Izlazna snaga paralelno priključenih kondenzatorskih baterija kvadratno je ovisna o iznosu napona u čvorištu priključenja što znači da ukoliko napon u predmetnom čvorištu opada, njihova snaga opada još brže što je problematično.

Kondenzatorske baterije

Paralelno priključene kondenzatorske baterije uključuju se u blokovima mehaničkim prekidačima (vrijeme uklopa im je oko 1 s) zbog toga one nisu u mogućnosti kontinuirano i glatko prilagođavati izlaznu snagu.

Velika prednost im je cijena (cijena 50 Mvar iznosi približno 1000000 USD).



Site view of the MSC - Willington, UK

Kondenzatorske baterije



Fakultet elektrotehnike i računarstva - Zavod za visoki napon i energetiku

Unska 3, HR-10000 Zagreb Tel: 01/ 6129 907, Fax: 01/ 6129 890 E-mail: zvne@fer.hr URL: <http://www.zvne.fer.hr/>

Paralelno priključene prigušnice



Prigušnice služe za potrošnju kapacitivne jalove snage proizvedene u dugačkim slabo opterećenim vodovima ili kabelima.

Najčešće se priključuju na tercijar transformatora zbog uštede na prekidaču za uključanje.

Postoje dvije izvedbe: sa željeznom jezgrom odvojenom zračnim rasporedom i bez željezne jezgre s magnetskim povratnim krugom.

Flexible AC Transmission System

FACTS naprave su izmjenični sustavi temeljeni na energetskej elektronici i drugoj statičkoj opremi kojima se povećava stabilnost i fleksibilnost prijenosnog sustava upravljanjem tokovima djelatne i jalove snage.

FACTS naprave doprinose povećanju prijenosne moći sa statičkog i dinamičkog aspekta rješavanjem problema stabilnosti napona te problema regulacije napona i kompenzacije jalove snage.

Djelovanje FACTS naprava je usmjereno prema prigušenju elektromehaničkih oscilacija, regulaciji tokova djelatnih i jalovih snaga, serijskoj i poprečnoj kompenzaciji te regulaciji kuta prijenosa.

Flexible AC Transmission System

FACTS tehnologija zasnovana je na energetskej elektronici, odnosno na elektroničkim ventilima i tiristorima.

U FACTS napravama koriste se standardni tiristori (u slučaju jednostavnijih naprava) odnosno, u slučaju složenijih naprava, tiristori s mogućnošću prekidanja struje i prije prolaska kroz nultu vrijednost (GTO - Gate Turn-Off tiristor i IGBT - Insulated-Gate Bipolar Transistor).

Flexible AC Transmission System

Vrijeme upravljanja je unutar nekoliko milisekundi, što znači da su u stanju kontinuirano upravljati karakterističnim varijablama.

FACTS uređaji ugrađuju se u postojeća postrojenja i ne zauzimaju puno prostora.

FACTS uređaji su dosta skupi ali jeftiniji od izgradnje dodatnih vodova.

Troškovi održavanja predmetnih uređaja su srednji.

Flexible AC Transmission System

Dvije su osnovne prednosti:

- povećanje prijenosne snage voda (mreže)
- bolja regulacija snage

Osobine uređaja energetske elektronike:

- brz odziv
- učestalo variranje izlazne snage
- podesivost izlazne veličine

Flexible AC Transmission System

Mogućnost upravljanja karakterističnim varijablama elektroenergetskog sustava:

- serijska impedancija,
- poprečna impendancija
- struja,
- napon,
- fazni kut,
- stupanj prigušenja
njihanja na različitim
frekvencijama ispod
nazivne.



TCSC Serra da Mesa, Brazil

Naprave energetske elektronike

Tiristor:

- Uključen u stanje vodljivosti korištenjem pozitivne gate-struje, ali ne može biti isključen korištenjem negativnog gate-impulsa.
- Kao i u slučaju ostalih naprava potrebni su elementi za zaštitu od tranzijenata, za ograničenje di/dt anode, za smanjenje dv/dt pri isključivanju te za smanjenje sklopnih gubitaka unutar naprave.

Naprave energetske elektronike

Gate Turn-Off tiristor (GTO):

- Može biti isključen korištenjem negativnog strujnog implusa na gate-u. Pojačanje struje isključenja (turn-off current) je nisko što znači da je negativna struja gate-a 20-25 % od struje koju se prekida. podesivost izlazne veličine

MOS-Controlled Tiristor (MCT):

- Kao GTO, ali s vrlo visokim pojačanjem struje isključenja.
- Lako uključiv u serijske i paralelne kombinacije.

Primjena FACTS uređaja

- 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.

Upravljanje 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),

Upravljanje tokovima snage

- injehtiranjem napona u serijskoj grani, uz bilo koji iznos kuta tog napona obzirom na napon čvorišta, moguće je upravljati iznosom i kutem struje voda (injehtiranjem fazora napona promjenjivog po kutu istodobno se upravlja tokom djelatne i jalove snage),
- 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.

Generacije FACTS uređaja

Prva generacija FACTS-a

- primjena tiristora u kombinaciji s reaktivnim elementima,
- poprečna kompenzacija (npr. SVC) za regulaciju napona,
- serijska kompenzacija (npr. TCSC) za regulaciju tokova snage.

Druga generacija FACTS-a

- GTO (Gate Turn-Off) tiristori u inverterskoj konfiguraciji naponskog izvora,
- poprečna kompenzacija (npr. STATCOM) korištenjem statičkih sinkronih kompenzatora,
- serijska kompenzacija (npr. SSSC) korištenjem statičkih serijskih sinkronih kompenzatora,
- kombinirana poprečno-serijska kompenzacija (UPFC).

Osnovni tipovi FACTS uređaja

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

- Serijski FACTS uređaji
- Poprečni FACTS uređaji
- Kombinirani serijsko-serijski uređaji
- Kombinirani serijsko-poprečni uređaji

Osnovni tipovi FACTS uređaja

Za serijsku kompenzaciju koriste se:

- TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) - tiristorski regulirani serijski kondenzator
- TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor) - tiristorski uključivi serijski kondenzatori
- GTO CSC (Controlled Series Compensation with GTO Converter)
- SSSC (Static Synchronounous Series Compensator) - statički serijski sinkroni kompenzator
- UPFC (Unified Power Flow Controler) - kombinirana poprečno-serijska kompenzacija
- IPFC (Interline Power Flow Controller)

Osnovni tipovi FACTS uređaja

Za poprečnu kompenzaciju koriste se:

- SVC (Static Var Compensator)
- ASVC (Advanced Static Var Compensator)
- STATCOM (Static Synchronounous Compensator)-
statički sinkroni kompenzator, negdje se naziva i SVG
(Static Var Generator)
- TCR (Thyristor Controlled Reactor) - tiristorski
regulirana prigušnica
- TSC (Thyristor Switched Capacitor) - kondenzator
uključiv pomoću tiristora
- SPC (GTO - based Switching Power Converter)

Osnovni tipovi FACTS uređaja

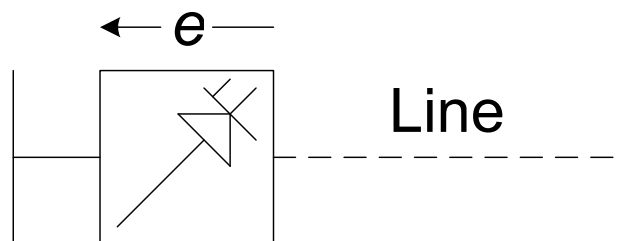
Za regulaciju kuta koristi se:

- PST (Phase Shifting Transformer)

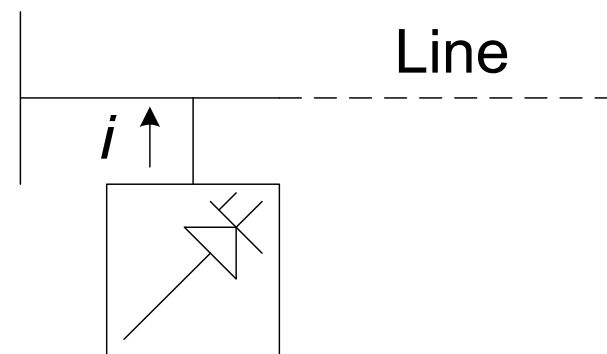
u dvije izvedbe

- TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator)
- TCQBT (Thyristor Controlled Quadrature Boosting Transformer)

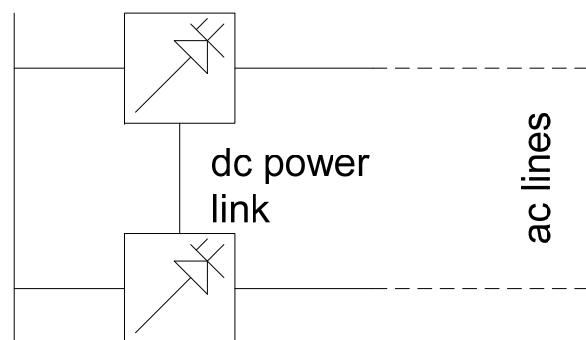
Osnovne vrste FACTS uređaja



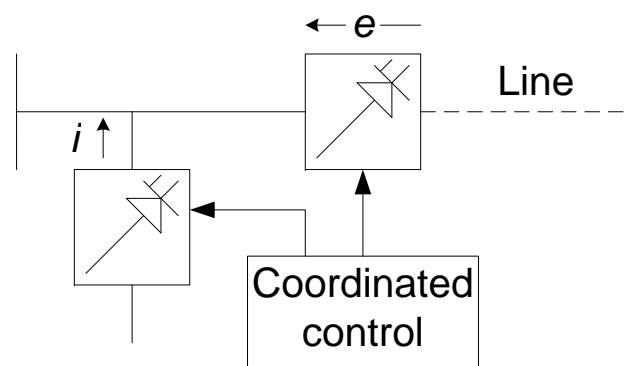
Serijski FACTS uređaji



Poprečni FACTS uređaji



Kombinirani serijsko-serijski uređaji



Kombinirani serijsko-poprečni uređaji

Serijski FACTS uređaji

Serijski FACTS uređaji reguliraju serijske tokove snaga pomoću injektiranog izvora napona u serijskom spoju s vodom.

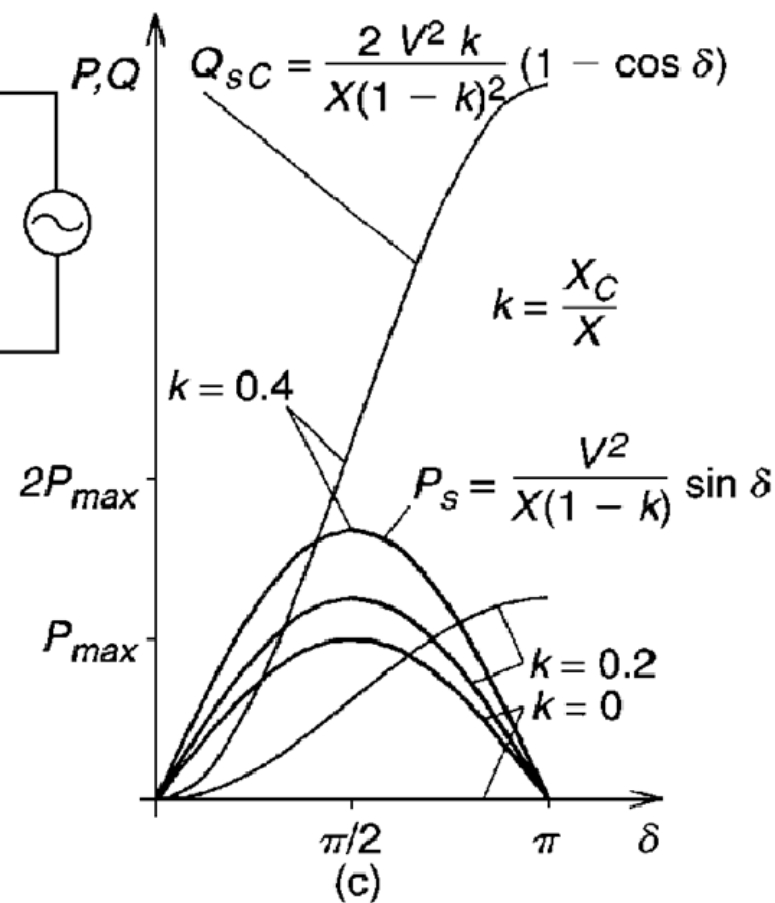
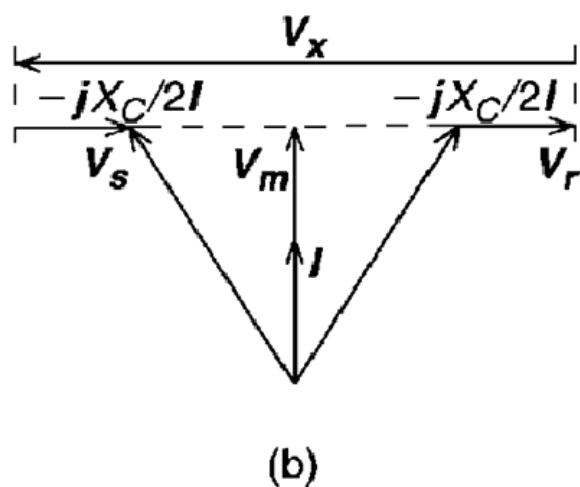
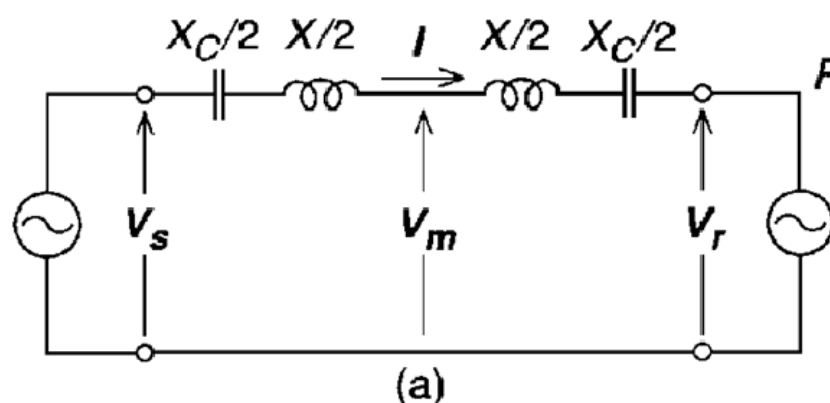
Serijska naprava se izvodi u obliku promjenjive impedancije (kondenzator ili prigušnica) ili promjenjivog izvora napona zasnovanog na energetskej elektronici.

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.

Serijski FACTS uređaji

Osnovna ideja vodilja serijske kapacitivne kompenzacije jest smanjenje ukupne serijske reaktancije između dvije točke prijenosnog sustava. U jednostavnom dvostrojnem sustavu - slika a), pomoću serijskog kondenzatora kompenzira se induktivna reaktancija voda prema standardnom vektorskom dijagramu - slika b). Prema očekivanju, djelatna snaga prijenosa izrazito se povećava s povećanjem stupnja serijske kompenzacije k - slika 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.

Serijski FACTS uređaji



Poprečni FACTS uređaji

Poprečni FACTS uređaji reguliraju iznos napona kontroliranim injehtiranjem jalove snage.

Kao i u slučaju serijskih naprava, izvedbe poprečnih naprava mogu biti u obliku promjenjivih impedancija, promjenjivih elektroničkih izvora napona ili njihove kombinacije. U osnovi, sve poprečne naprave injehtiraju struju u čvorište povezivanja sa sustavom.

Poprečni FACTS uređaji

Čak i promjenjiva poprečna impedancija 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.

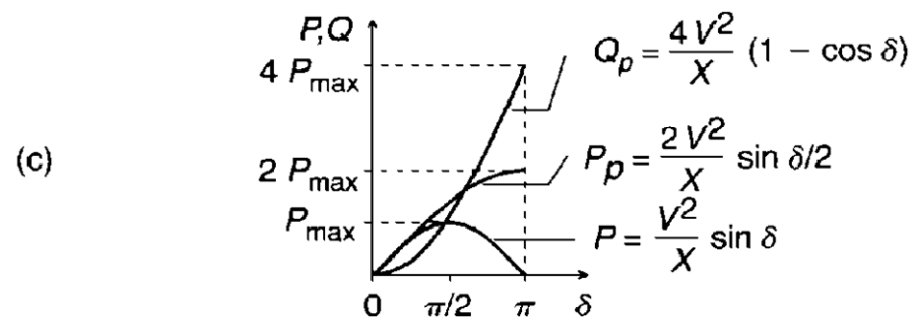
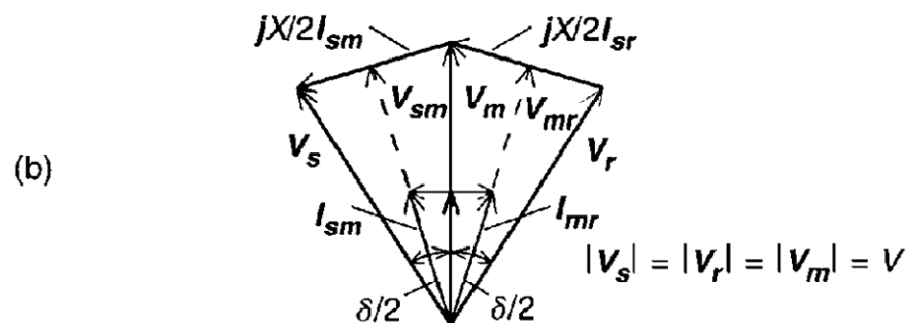
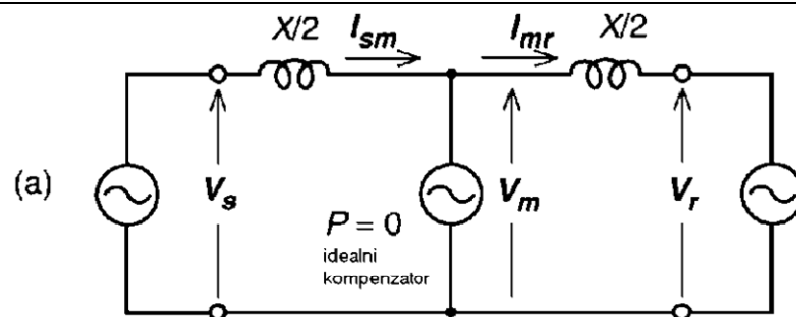
Poznato je da primjena odgovarajuće poprečne kompenzacije jalove snage utječe na povećanje prijenosne moći i poboljšanje profila napona uzduž voda.

Poprečni FACTS uređaji

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 u svrhu 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 njihovanja.

Poprečni FACTS uređaji

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

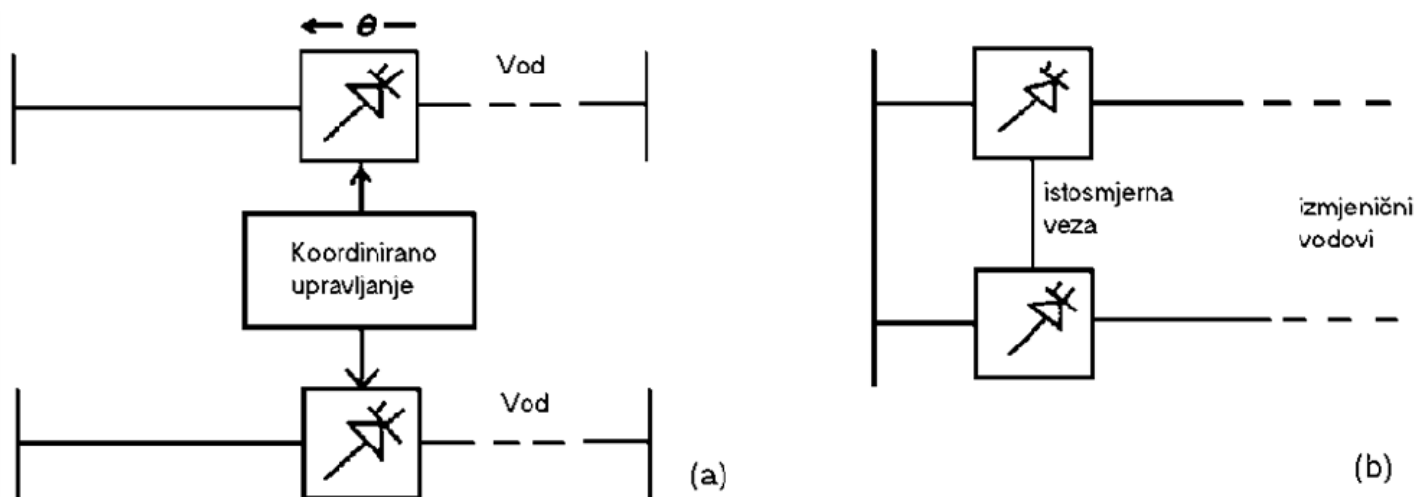


Poprečni FACTS uređaji

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 s udvostručenjem broja segmenata voda. S povećanjem broja segmenata, promjena napona uzduž voda značajno se smanjuje, približavajući se u idealnom slučaju konstantnm profilu.

Kombinirane serijsko-serijske naprave

Ova kombinacija ima dva moguća oblika. U prvom obliku se s odvojenim serijskim napravama koordinirano upravlja u sustavu s više vodova - slika 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 b).

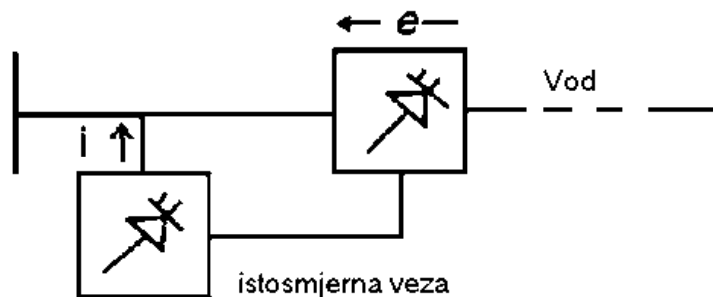


Kombinirane serijsko-serijske naprave

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 u svrhu transfera djelatne snage.

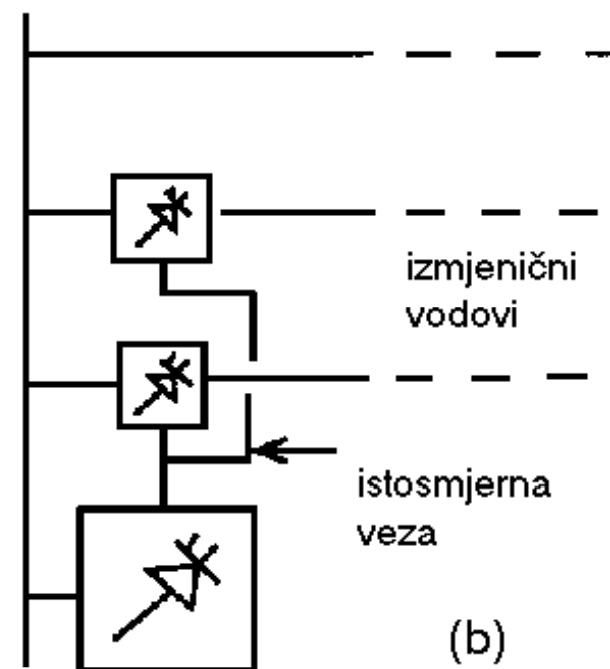
Kombinirane serijsko-poprečne naprave

Ova kombinacija ima oblik razdvojenih poprečnih i serijskih naprava s 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.



Kombinirane serijsko-poprečne naprave

Kada se poprečna i serijska naprava objedine javlja se razmjena djelatne snage između serijske i poprečne naprave putem istosmjernje veze. Moguća je i izvedba kod koje svaki vod zahtijeva posebnu serijsku napravu - slika b), osobito ako se primjenom želi izbjeći problem ispada voda.



Kombinirane serijsko-poprečne naprave

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 njihanje 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 u svrhu učinkovitije regulacije napona i prigušenja njihanja napona.

Kombinirane serijsko-poprečne naprave

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.

Koordinacija više FACTS uređaja

- Lokalna
 - Shunt uređaji za regulaciju napona: SVC, STATCOM
 - Lokalna regulacija napona, bitno za podupiranje prijenosa snage
- Globalna
 - Uređaji u seriji za regulaciju tokova: TCSC, UPFC
 - Učinak na tokove snage na širem području
 - Lokacijski: kaskadirani serijski uređaji - gdje i koliko?

Koordinacija više FACTS uređaja

- Decentralizirani pristup
 - Planiranje regulacije korištenjem lokalnih signala; distribuirane regulacijske funkcije; implicitna koordinacija; kvar jedne komponente ne mora biti fatalan - strategije za oporavak; metodologije planiranja od *ad hoc* do *NP-hard*
- Centralizirani pristup
 - Viševarijabilni regulatori; planiranje upravljanja iz centralne stanice, eksplicitna koordinacija u procesu planiranja; potreban pomoćni sustav zbog pouzdanosti

Koordinacija više FACTS uređaja

- Niski autoritet
 - Uređaji koji utječu na tokove i dinamiku na nekoliko sabirnica, poput SVC
- Visoki autoritet
 - Uređaji čiji se učinak osjeti na velikom području, poput TCSC

Koordinacija više FACTS uređaja

- Jednostavni, nisko rangirani regulatori
 - Nisko rangirane regulatore je lakše primjeniti, no mogu biti teži za proizvodnju i dokazivanje optimiranosti
- Složeni, visoko rangirani regulatori
 - Višestruke funkcije; logika i preklapanje; adaptivna regulacija; potreba za odvajanjem visoko rangiranih regulatora u prepoznatljive dijelove (npr. niskopropusni filter, pojasni filter)

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 s minimalnim uskladištenjem na istosmjernoj strani.

Zasnovanost FACTS naprava

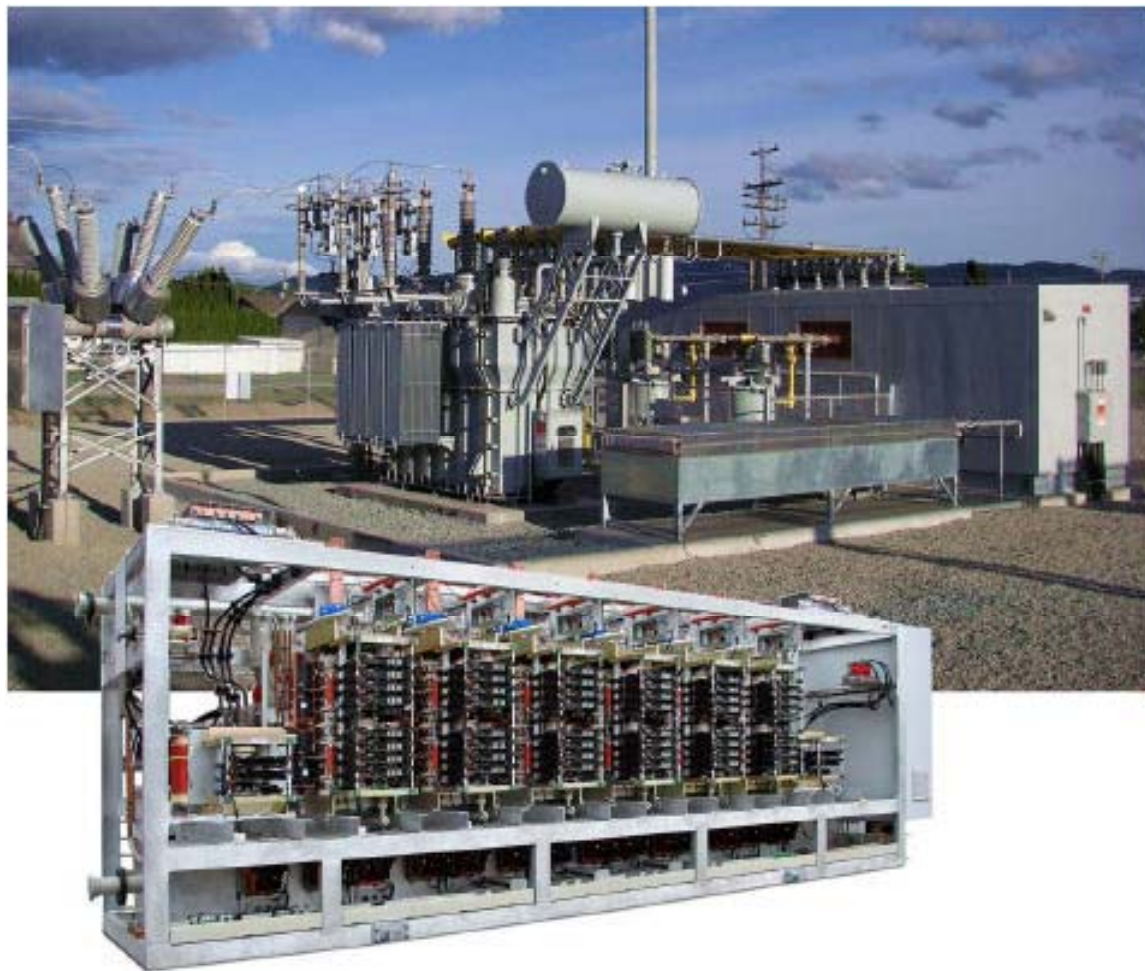
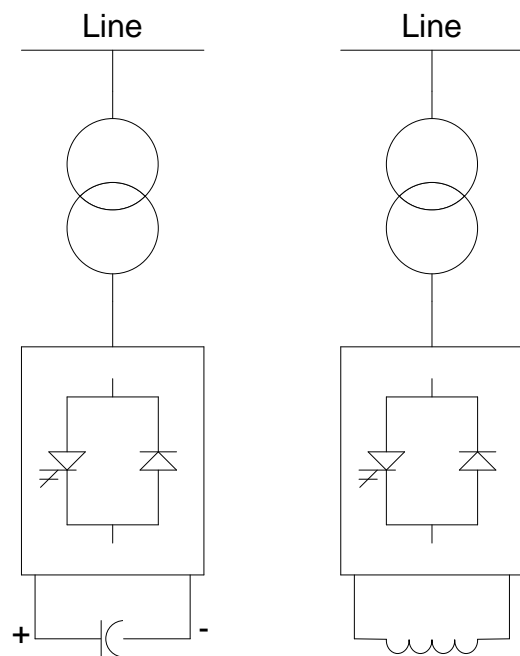
- Ako je fazni kut između struje i napona različit od 90° , uskladištenje na istosmjernoj strani može se razlikovati od minimalnog koje je potrebno u pogonu pretvarača kao izvora samo jalove snage. Dakle, potrebno je skladište energije.
- Svaka od serijskih, poprečnih ili kombiniranih serijsko-poprečnih naprava, općenito može uključivati u sebi skladište poput kondenzatora, baterije ili supravodljivog magneta čime se dodaje nova dimenzija FACTS tehnologiji.

Poprečni FACTS uređaji - STATCOM

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. 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 u svrhu neutraliziranja harmonika.

Poprečni FACTS uređaji - STATCOM

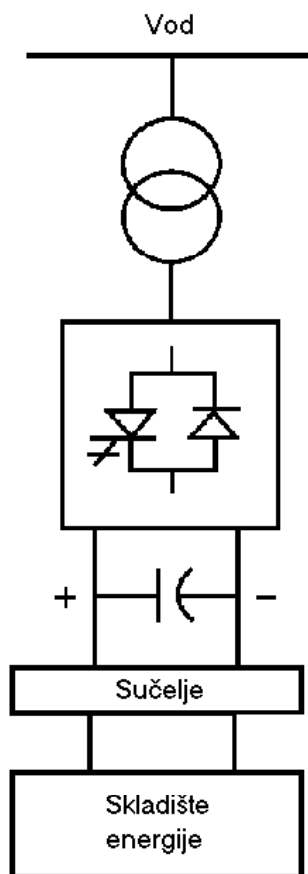


Poprečni FACTS uređaji - SSG

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

SSG zapravo je 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.

Poprečni FACTS uređaji – SSG i BESS



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.

Poprečni FACTS uređaji – BESS

Prilikom 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.

Poprečni FACTS uređaji - SMES

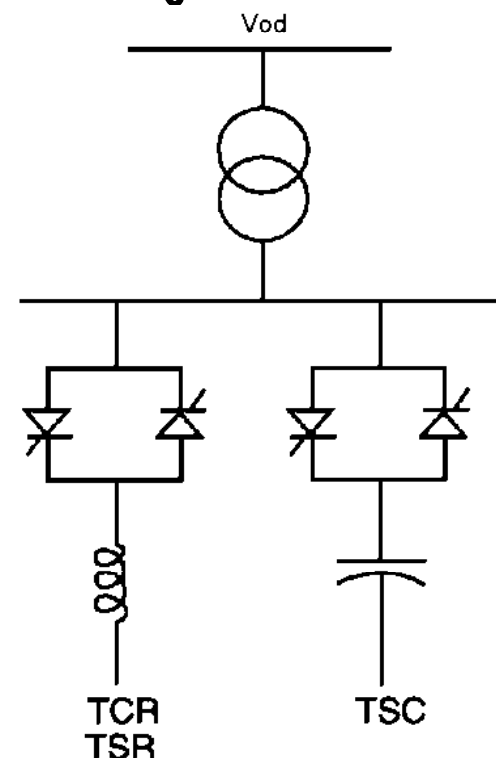
Slijedeći podskup SSG-a čini naprava poznata kao **Sustav uskladištenja energije pomoću supravodljivog magneta (eng. SMES, Superconducting Magnetic Energy Storage)**. Supravodljivi elektromagnetski sustav uskladištenja energije koji sadrži elektroničke pretvarače. Može brzo injektirati ili apsorbirati 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.

Poprečni FACTS uređaji - SVC

Statički var kompenzator (eng. SVC, Static Var Compensator). Statički generator jalove snage u poprečnom spoju koji se koristi u svrhu 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.



Poprečni FACTS uređaji - SVC



Site View SVC Born Jesus da Lapa, Brazil

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 apsorbciju 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.

Poprečni FACTS uređaji - TCR

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.

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

Poprečni FACTS uređaji - TSR

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

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

Poprečni FACTS uređaji - TSC

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

TSC je također podvrsta SVC-a kod koje se tiristorski prekidači koriste u svrhu 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 s primjenom regulacije kuta paljenja.

Poprečni FACTS uređaji - SVG

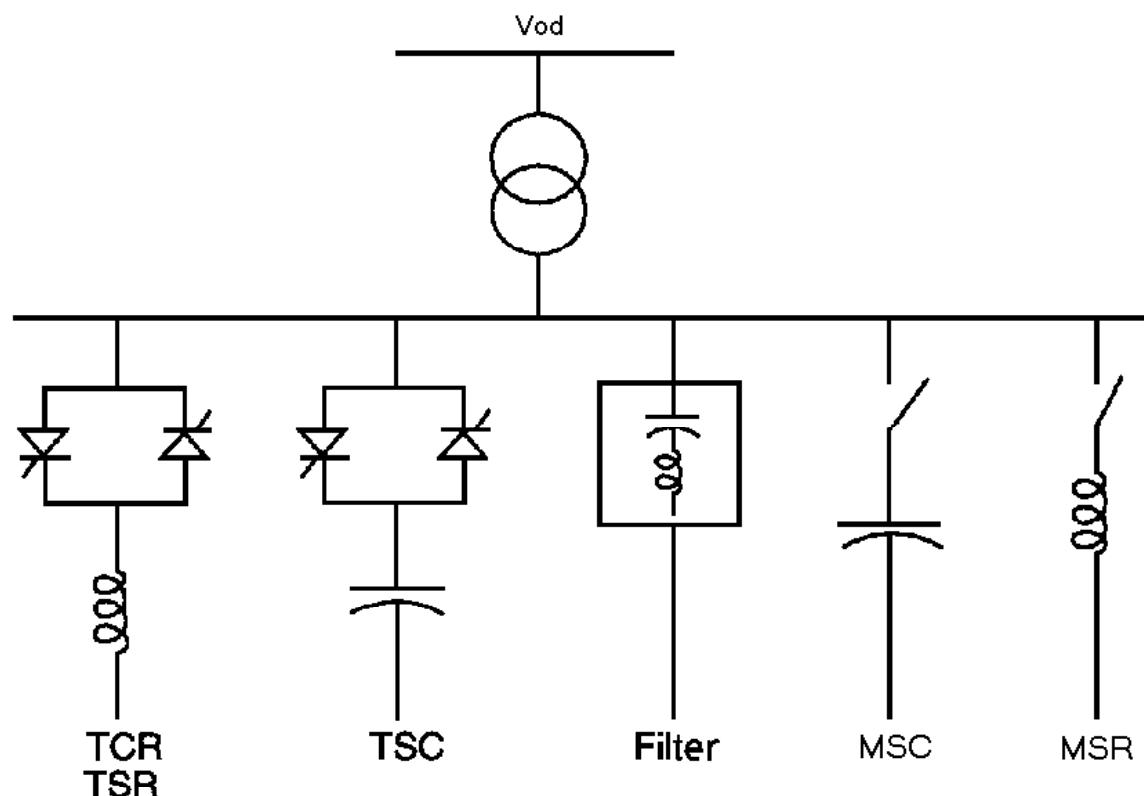
Statički var generator ili trošilo (eng. SVG, Static Var Generator or Absorber). Statička električna naprava, oprema ili sustav koji je sposoban razmjenjivati upravljivu kapacitivnu i/ili induktivnu struju s izmjeničnim sustavom te time proizvoditi ili trošiti jalovu snagu. Općenito se sastoji of poprečno priključenih tiristorski upravljivih prigušnica i/ili tiristorski 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 s odgovarajućim upravljačkim petljama kako bi izlazna jalova snaga bila promjenjiva u skladu sa specifičnim ciljevima kompenzacije.

Poprečni FACTS uređaji - SVS

Statički var sustav (eng. SVS, Static Var System).

Kombinacija različitih statičkih i mehanički uklopivih var kompenzatora s koordiniranim izlaznim veličinama.

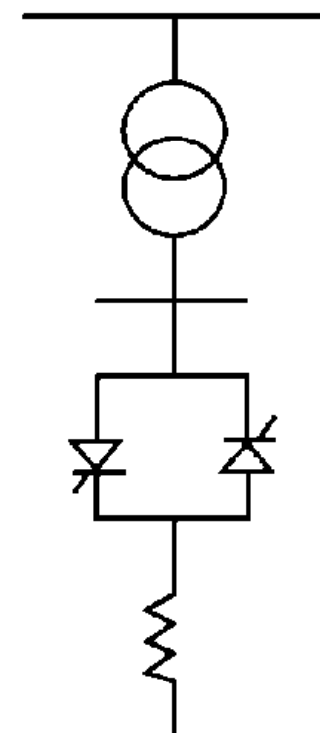


Poprečni FACTS uređaji - TCBR

Tiristorski upravljivi kočni otpor (eng. TCBR, Thyristor Controlled Braking Resistor).

Tiristorski uklopivi otpornik u poprečnom spoju s kojim se upravlja u svrhu pomoćne stabilizacije sustava ili minimiziranja ubrzavanja rotora generatora tijekom poremećaja.

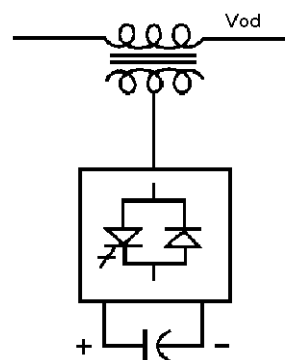
TCBR uključuje uklapanje otpornika opremljenog s tiristorskim prekidačem s regulacijom kuta paljenja na razini perioda (slika IV.5). U svrhu snižavanja troškova, TCBR može biti samo tiristorski uklopiv, odnosno bez regulacije kuta paljenja. Međutim, uz regulaciju kuta paljenja, upravljanje na razini poluperioda primjenjivo je u svrhu selektivnog prigušenja njihanja niske frekvencije.



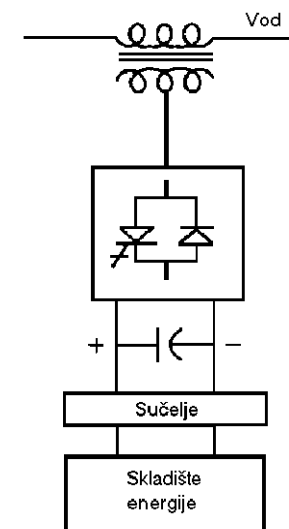
Serijski FACTS uređaji - SSSC

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 u svrhu poboljšanja prijelaznih pojava u sustavu korištenjem dodatne privremene kompenzacije djelatne snage (trenutna promjena djelatne komponente pada napona na vodu).



(a)



(b)

Serijski FACTS uređaji - SSSC

SSSC, jedna je od najznačajnijih FACTS naprava. Izvedbom podsjeća na STATCOM, ali injektira izvor napona u serijsku granu - slika 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 b).

Serijski FACTS uređaji - IPFC

Regulator toka snage među vodovima (eng. IPFC, Interline Power Flow Controller). Kombinacija dvaju ili više SSSC-ova priključenih na zajedničku istosmjernu vezu u svrhu 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.

Serijski FACTS uređaji - TCSC

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.



Site View of the TCSC Serra da Mesa, Brazil

Serijski FACTS uređaji - TCSC

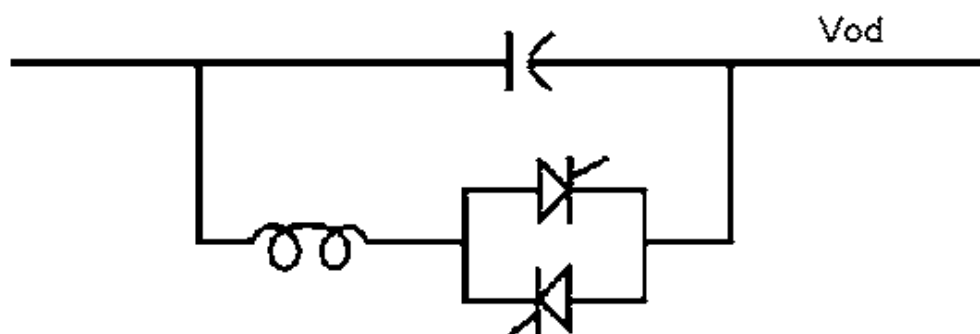


Fakultet elektrotehnike i računarstva - Zavod za visoki napon i energetiku

Unska 3, HR-10000 Zagreb Tel: 01/ 6129 907, Fax: 01/ 6129 890 E-mail: zvne@fer.hr URL: <http://www.zvne.fer.hr/>

Serijski FACTS uređaji - TCSC

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. Kada kut paljenja TCR-a postaje 180° , prigušnica je u stanju nulte vodljivosti te serijski kondenzator ima svoju punu impedanciju.



Serijski FACTS uređaji - TCSC

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.

Serijski FACTS uređaji - TSSC

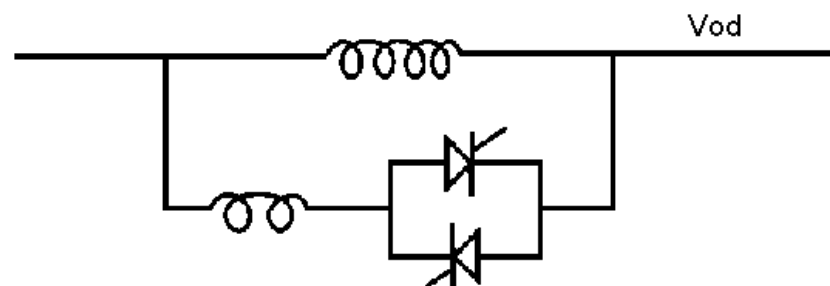
Tiristorski uklopivi serijski kondenzator (eng. TSSC, Thyristor Switched Series Capacitor). Kompenzator s kapacitivnom reaktancijom koji se sastoji od serijske kondenzatorske baterije u paralelnom spoju s tiristorski uklopivom prigušnicom. Omogućava skokovito upravljanje sa serijskom kapacitivnom reaktancijom.

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.

Serijski FACTS uređaji - TCSR

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 IV.8) poprimi iznos od 180° , prestaje stanje vođenja 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.



Serijski FACTS uređaji - TSSR

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 vođenja ili nultog vođenja (bez mogućnosti upravljanja kutem paljenja). Omogućava postizanje kombinacije skokovitih serijskih induktancija.

Kombinirani FACTS uređaji

Kombinirani FACTS uređaji istodobno reguliraju iznos napona i tokove djelatne i jalove snage kroz spojni vod.

Kombinirane poprečno-serijske naprave - UPFC



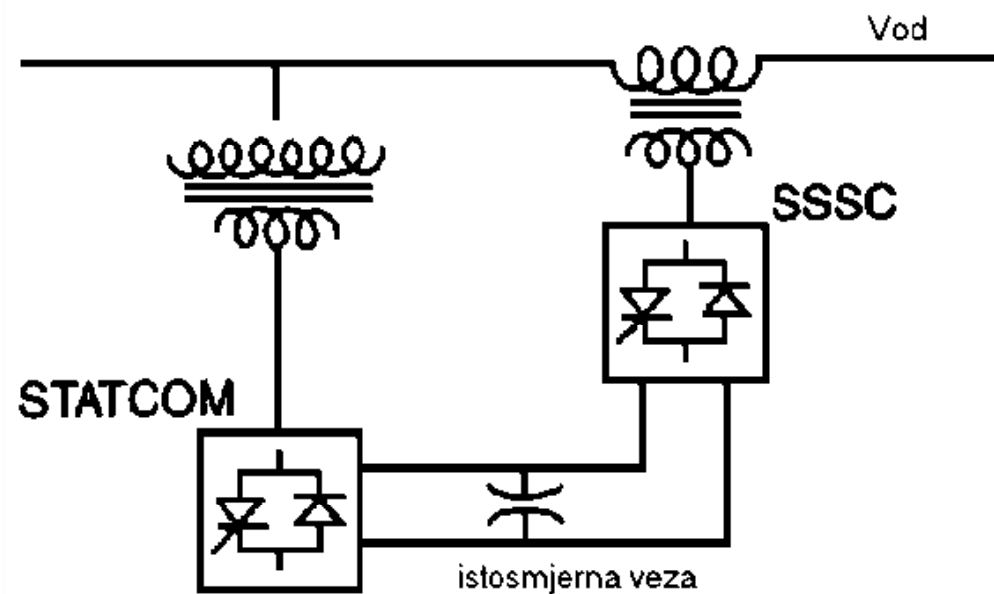
Objedinjeni regulator toka snage (eng. UPFC, Unified Power Flow Controller). Kombinacija statičkog sinkronog kompenzatora (STATCOM) i statičkog serijskog kompenzatora (SSSC) koji su spojeni putem zajedničke istosmjerne veze kako bi omogućili dvosmjerni tok djelatne snage između izlaznog terminala serijskog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

Upravljanje ovom napravom - slika 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.

Kombinirane poprečno-serijske naprave - UPFC



Alternativno, moguće je upravljanje s tokovima djelatne i jalove snage voda. UPFC također omogućava izvođenje neovisne poprečne kompenzacije jalove snage.



Kombinirane poprečno-serijske naprave - 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 razmjenom 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.

Kombinirane poprečno-serijske naprave - TCPST



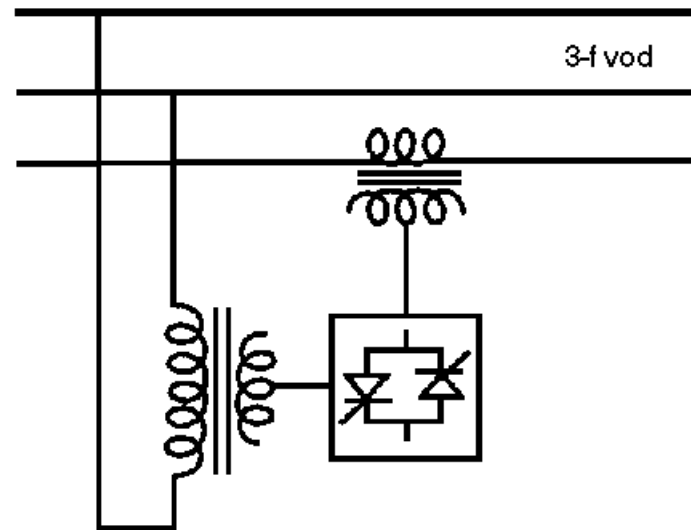
Tiristorski upravljivi zakretni transformator (eng. TCPST, Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer). Zakretni transformator koji korištenjem tiristorskih prekidača omogućava brze promjene faznog kuta.

Općenito uzevši, zakretni transformator se zasniva na dodavanju okomitog vektora napona u seriju s fazom - slika. 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.

Kombinirane poprečno-serijske naprave - TCPST



Koncept prema kojem je moguće izvesti reverziranje napona koristi se u svrhu 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).



Kombinirane poprečno-serijske naprave - ICP



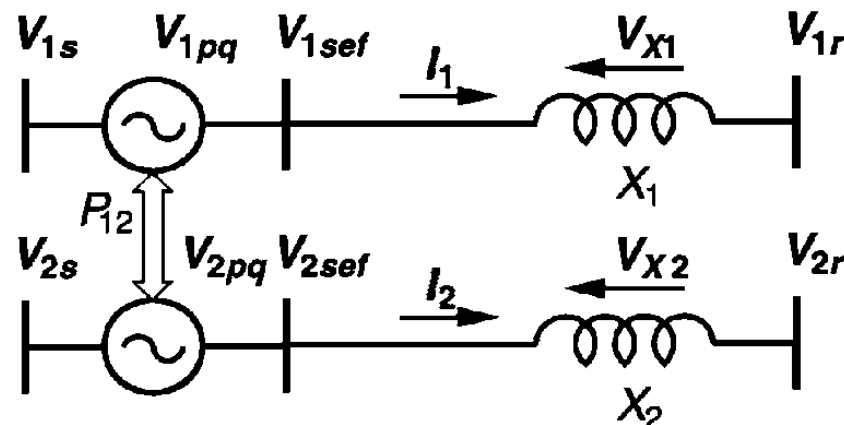
Međufazni regulator snage (eng. IPC, Interphase Power Controller). Serijska naprava pomoću koje se upravlja djelatnom i jalovom snagom. Sastoji se, u svakoj fazi, od induktivne i kapacitivne grane koje su priključene na međusobno odvojene i fazno zakrenute napone.

Djelatna i jalova snaga mogu se neovisno definirati prilagodbom faznog zakreta i/ili impedancija grana uz korištenje mehaničkih ili elektroničkih prekidača - slika.

Kombinirane poprečno-serijske naprave - ICP



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 definiranog koncepta serijske naprave koji može biti projektiran tako da omogući upravljanje djelatnom i jalovom snagom.



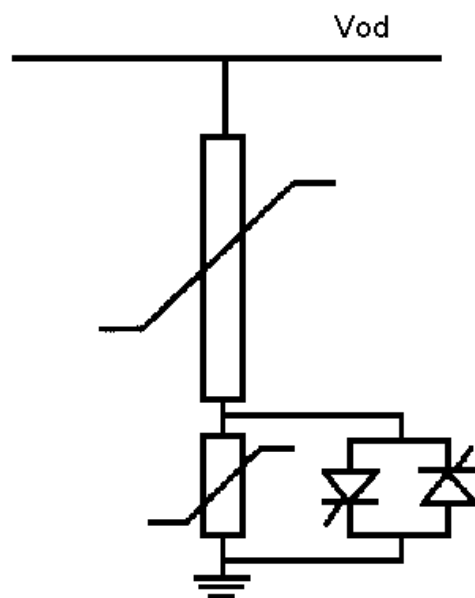
Ostale naprave - TCVL

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

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

Ostale naprave - TCVL

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



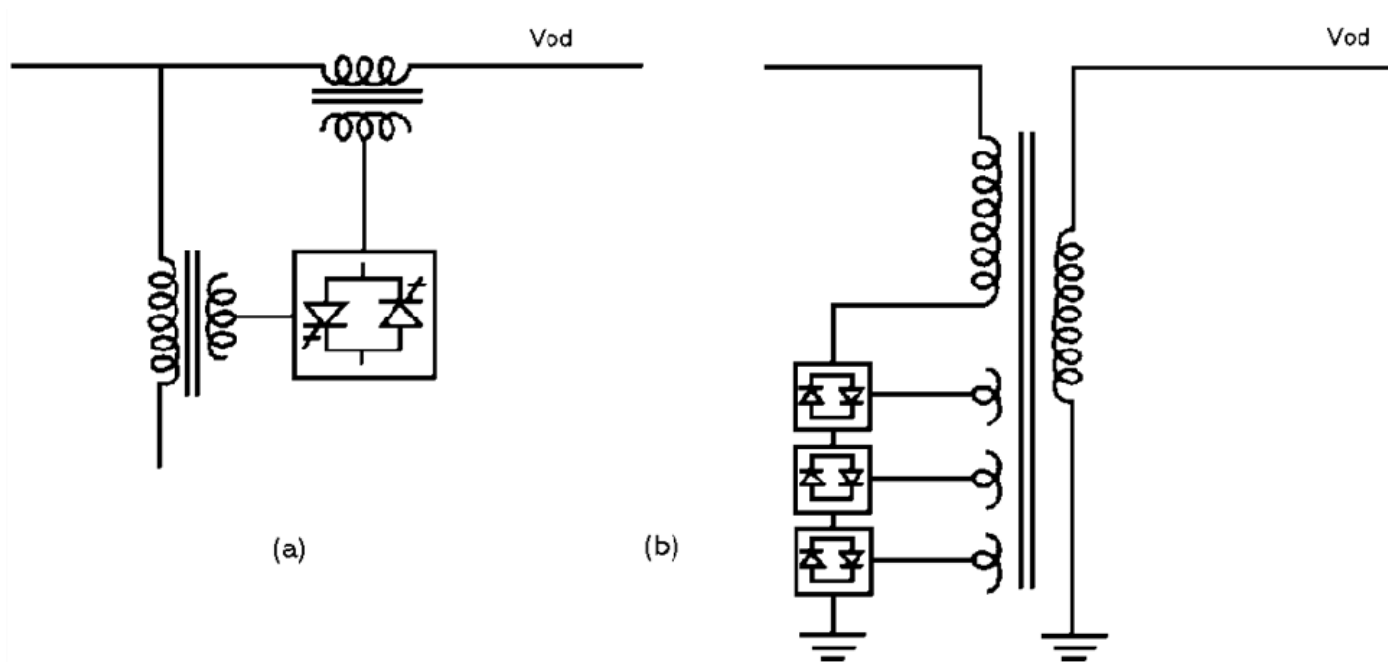
Ostale naprave - TCVR

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

U praktičnim primjenama, naprava može biti u izvedbi s tiristorski upravljivim ac/ac naponskim pretvaračem s kojim se injektira promjenjivi izmjenični napon istog faznog kuta u seriju s vodom - slika a) ili kao običan transformator s tiristorski upravljivim prijenosnim omjerom - slika b).

Ostale naprave - TCVR

Navedene relativno ekonomične naprave mogu biti vrlo učinkovite u upravljanju tokom jalove snage između dva izmjenična sustava.



FACTS naprave omogućuju

- 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.

FACTS naprave omogućuju

- 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.