

MOŽNOSTI IN OMEJITVE PRENOSA ELEKTRIČNE ENERGIJE NA DOLGE RAZDALJE

3. del – Povečanje prenosne zmogljivosti elektroenergetskih sistemov s sodobnimi koncepti

Dušan Povh¹, Rafael Mihalič²

^{1, 2} Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: rafael.mihalic@fe.uni-lj.si

Povzetek. V delu predstavljamo dva sklopa tehnologij prenosa električne energije, ki ju je omogočil razvoj močnostne elektronike. Prvi sklop je tehnologija visokonapetostnih enosmernih prenosov, ki se je uveljavila kot pomembna alternativa k prenosu z izmeničnim tokom. Glavne prednosti te tehnologije so zlasti kontrola pretokov moči, možnost povezave asinhrono delujočih sistemov, manjši posegi v okolje (ožji koridorji), nižja cena od rešitev AC pri dolgih prenosih, možnost prenosa po dolgih kabljih. Analiza prenosa energije v močno obremenjenem hipotetičnem zazankanem sistemu je pokazala bistvene ekonomske prednosti HVDC pred rešitvijo AC.

Drugi sklop rešitev, t.j. tehnologija FACTS, omogoča izboljšanje obratovalnih razmer in povečanje prenosne zmogljivosti izmeničnih EES z dinamično regulacijo pretokov delovnih in/ali jalovih moči. V stacionarnih razmerah je tako mogoče razbremeniti močno obremenjene prenosne poti. Analiza vpliva reguliranja pretokov moči med Slovenijo in Italijo je pokazala, da bi bilo mogoče v razmerah pred razpadom italijanskega EES leta 2004 tako razbremeniti preobremenjen vod med Italijo in Švico, katerega odklop je imel bistveno vlogo pri omenjenem razpadu. Možnost dinamične regulacije pretokov moči z napravami FACTS ponuja rešitve za EES, v katerih so omejitveni dejavniki prenosa stabilnostni problemi.

Ključne besede: prenos električne energije, elektroenergetski sistemi, visokonapetostni enosmerni prenos, FACTS

POSSIBILITIES AND LIMITATIONS OF ELECTRIC POWER TRANSMISSION OVER LONG DISTANCES

Part 3 – Enhancement of power systems transmission capabilities using modern concepts

Extended abstract. In the paper, two technologies for electric power transmission based on power electronics are presented. The first is the HVDC and the second is the FACTS technology. The HVDC transmission has become an important alternative to the AC transmission. Since the seventies, and according to expectations for the next fifteen years, the world-wide trend of the HVDC installations shows an almost exponential growth, i.e. doubling each fifteen years. The HVDC advantages are power flow control, possibility to connect systems that do not operate synchronously, less environmental impact (about three times more power transmitted at the same corridor width than over AC lines), economic advantages at long distance transmission and long cable connections realised without compensation. An analysis of transmission of a large amount of power through the meshed system, consisting of subsystems connected by relatively weak interconnections (as is the case in Europe), shows

prevailing economic benefits of the HVDC solution over the AC solution.

The FACTS technology enables enhancement of transmission capabilities of power networks by dynamic power flow control. Analysis of power flow control via the Slovenian power network by FACTS shows a possible reduction of line loading between Swiss and Italy, especially of the one, whose failure played a decisive role during the Italian black-out in 2004. On the other hand, by applying FACTS the network stability margin increases and along with it also the network transmission capability in cases where dynamic phenomena are the limiting factor. The paper presents a comparison between the FACTS devices effectiveness regarding power oscillation damping and transient stability margin enhancement. As expected, devices of the second generation are more effective than those of the first generation.

Keywords: power transmission, electric power systems, HVDC, FACTS

1. Uvod

Elektroenergetska omrežja (EES) so se razvijala od začetka elektrifikacije, od majhnih, izoliranih sistemov z elektrarnami, relativno blizu odjemalcev, do današnjih velikih in kompleksnih omrežij, ki se razprostirajo čez cele kontinente. Prenosne razdalje od elektrarn do porabnikov so bile v začetku kratke in zato potrebne obratovalne napetosti nizke. S povezavo omrežij, gradnjo velikih hidroelektrarn in elektrarn na premog na območjih, ki so oddaljena od centrov porabe, so nastale v omrežjih potrebe po prenosu velikih količin energije na velike razdalje [1]. Taki prenosi so zahtevali prehod na višje obratovalne napetosti. V Evropi je najvišja napetost 400 kV, na Daljnem vzhodu večinoma 550 kV ter v Ameriki 550 in 800 kV. V nekaterih državah razmišljajo ali načrtujejo tudi 1150 kV. Tudi obremenitve daljnovodov v omrežjih se z naraščanjem potreb po energiji močno povečujejo. Prenosni sistemi z izmeničnim tokom pri visokih napetostih in velikih razdaljah vodijo k napetostnim problemom in omejitvam zaradi stabilnosti obratovanja [2].

Vzporedno z razvojem omrežij in ob tem nastajajočih obratovalnih problemih so bile razvite tudi ustrezne tehnične rešitve, npr. paralelna in serijska kompenzacija. S hitrim razvojem močnostne elektronike so nastale rešitve, ki dajejo tako tehnične kot tudi ekonomske prednosti. Najprej se je začela razvijati tehnologija enosmernega prenosa (HVDC- High Voltage Direct Current), predvsem kot alternativa prenosu električne energije z izmeničnim tokom. Pozneje so razvili tudi naprave FACTS (Flexible AC Transmission System) za podporo obratovanja izmeničnih omrežij. Obe tehnologiji povezujeta močnostno elektroniko s konvencionalnimi napravami in hitro digitalno regulacijo. Članek bo opisal osnove obeh tehnologij in njihovo uporabo v omrežjih.

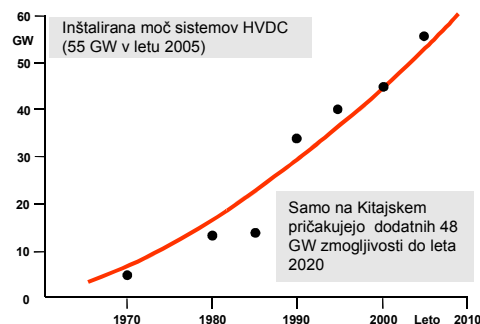
2. Prenos električne energije z enosmernimi sistemi

2.1 Razvoj visokonapetostnih enosmerenih prenosnih sistemov (HVDC)

Prvi komercialni visokonapetostni enosmerni prenosni sistemi so bili zgrajeni pred 50 leti. Tedaj so uporabljali še živosrebrne ventile, vendar je bila ta tehnologija draga in dokaj nezanesljiva. Uporabili so jo le tam, kjer prenos s sistemi izmeničnega toka ni bil mogoč. Prvi večji projekti so bili predvsem dolge podvodne kabelske povezave in prenos na dolge razdalje.

Razvoj tehnike enosmerenih prenosov se je v 70. letih prejšnjega stoletja pospešil z naglim razvojem močnostne elektronike. Nove generacije tiristorjev za čedalje višje napetosti in višje toke so omogočile bistveno zmanjšanje stroškov pretvorniških postaj. Hiter razvoj elektronike in digitalnih regulacij je pripomogel k temu, da so postale postaje preprostejše in zanesljivejše. Poleg tega so enosmerni prenosi prevzeli

dodatne systemske funkcije za podporo obratovanju izmeničnih sistemov, na primer napetostno regulacijo, regulacijo pretokov moči in dušenje nihanj v omrežju. Enosmerni prenosi s tiristorsko tehnologijo so dandanes dozorela in zanesljiva tehnologija, ki je pomembna alternativa prenosu z izmeničnim tokom. Slika 1 kaže rast skupne inštalirane moči postaj enosmernega prenosa, ki trenutno presega 50 GW (slika 1). V prihodnjih 15 letih pričakujemo podvojitve te moči, kar pomeni, da moč enosmerenih prenosov bistveno hitreje narašča kot razvoj visokonapetostnih izmeničnih omrežij.

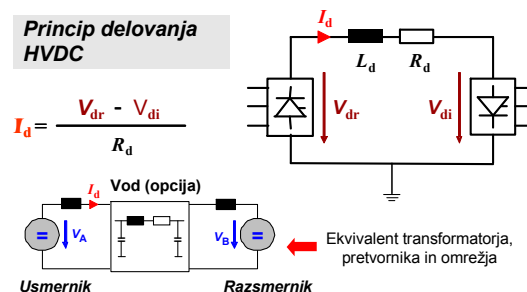


Slika 1: Razvoj inštalirane moči sistemov HVDC
Figure 1: Development of installed HVDC capacity

Razvoj tehnologije enosmerenih prenosov poteka v smeri nadaljnje racionalizacije in uvajanja novih tehnologij. Predvsem uporaba odklopljivih polprevodniških elementov (GTO, IGBT) v napetostnih pretvornikih (Voltage-Sourced Converter) ponuja kljub trenutno še višjim stroškom v primerjavi s tiristorsko tehnologijo v nekaterih aplikacijah dodatne prednosti.

2.2 Tehnične in ekonomske prednosti enosmerenih prenosov

Čprav je tehnika postaj enosmernega prenosa kompleksna, saj jo sestavljajo poleg vrste klasičnih naprav še naprave močnostne elektronike, digitalne tehnike in komunikacijski sistemi, jo lahko za razumevanje njenega delovanja v omrežjih predstavimo dokaj preprosto, kot je prikazano v sliki 2 [3].



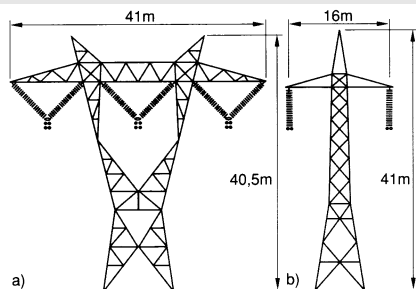
Slika 2: Princip enosmernega prenosa
Figure 2: Principle of HVDC

Enosmerni prenos predstavljata dve pretvorniški postaji in povezava med njima prek gladilnih dušilk in enosmernega daljnovoda ali kabla (slika 2). Pri postajah "back-to-back" sta oba pretvornika povezana le prek

gladilne dušilke. Predstavimo ju lahko kot enosmerna napetostna vira, ki ju v določenih mejah reguliramo. Med njima in izmeničnima omrežjema, med kateri sta ta priključena, prihaja do medsebojnih vplivov (izmenjava jalove moči, harmonski toki). Kljub temu za predstavitev delovanja enosmernega prenosa zadostuje shematična slika 2. S tem poenostavljenim modelom je mogoče pojasniti glavne prednosti obratovanja enosmernih prenosov:

- Enosmerni tokokrog ločuje izmenični omrežji, ki napajata enosmerni prenos. Zato lahko enosmerni prenos povezuje omrežja različnih frekvenc, (npr. 50 in 60Hz) ali omrežji iste nazivne frekvence, ki ne obratujeta sinhrono. Povezujemo lahko torej omrežja, ki jih z izmeničnimi povezavami ne moremo oz. le z velikimi dodatnimi investicijami.
- Prenašamo lahko natančno določeno moč. Zaradi hitre regulacije pretvornikov je prenos v veliki meri neodvisen od razmer v omrežjih. Ker je časovna konstanta spremembe moči pri enosmernem prenosu reda velikosti 50 do 100 ms, lahko aktivno vplivamo na dinamične razmere v omrežjih.
- V enosmernih sistemih jalova moč ne obstaja, zato ni potreb po kompenzaciji. Napetostni padec nastaja le zaradi ohmske upornosti daljnovodov in znaša pri ekonomskem dimenzioniranju reda velikosti 5% na 1000 km. Zato so tehnično gledano prenosni brez težav mogoči do razdalje več tisoč kilometrov.
- Regulacija pretvornikov omogoča pri kratkih stikih na DC vodu odklop enosmernega toka v 10 do 20 ms. Zato enosmerni prenos nimajo dodatnega vpliva na kratkostično moč izmeničnih omrežij. Postaje "back-to-back" se lahko celo uporabljajo za omejitve kratkostičnih moči.

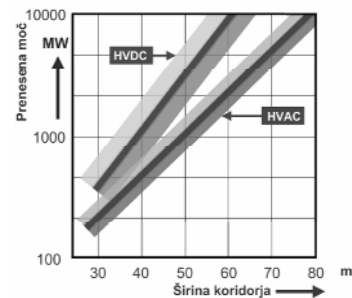
Primerjava stebrov za 800 kV AC vod (slika a) in ± 500 kV DC vod (slika b) za enako prenosno moč 3000 MW



Slika 3: Primerjava daljnovodov za AC in HVDC prenos
Figure 3: Comparison between AC and HVDC line towers

Stroški pretvorniških postaj so odvisni od nazivne moči, napetostnega nivoja, zahtev po jalovi kompenzaciji, filtrov za dušenje harmonskih tokov in drugih parametrov, kot so npr. prostorske in klimatske razmere. Vendar lahko za grobo ekonomsko analizo računamo s stroški 240 €/kW za postaji reda velikosti 2000 MW pri napetostnem nivoju ± 500 kV oziroma

200 €/kW za postaje "back-to-back" moči 600 do 1000 MW. Ekonomska prednost enosmernih prenosov temelji predvsem na bistveno nižjih stroških daljnovodov. Slika 3 prikazuje daljnovoda za izmenični in enosmerni prenos primerljive moči. Poleg tega ima bipolaren enosmerni daljnovod v primeri z izmeničnim večjo obratovalno zanesljivost, ker lahko v primeru izpada enega pola obratuje prek preostalega pola (monopolarno obratovanje). Stroški enosmernih vodov znašajo okrog 70% stroškov primerljivega izmeničnega daljnovoda enake prenosne moči. Če je pri izmeničnem prenosu zaradi zahtevane zanesljivosti potreben rezervni daljnovod, se stroški obeh sistemov nagnejo še bolj v korist enosmernega prenosa. Na sliki 4 je primerjava potrebne širine trase za prenos s HVDC oziroma AC sistemom. Z enosmernim vodom lahko prenašamo po isti trasi trikratno moč. V pogojih, kjer imamo težave s trasami, kar je na gostejše naseljenih območjih pogosto, daje enosmeren prenos s tem veliko dodatno prednost. Enosmerne prenose zato lahko uporabimo kot prenosne koridorje velikih moči tudi znotraj izmeničnih omrežij. Ekonomski računi kažejo, da je HVDC zaradi prihrankov pri stroških za daljnovode pri prenosnih razdaljah nad 800 km cenejši. Pri upoštevanju še drugih tehničnih prednosti pa je ta mejna razdalja še nižja.



Slika 4: Primerjava širine tras daljnovodov za prenos z enosmernim oz. izmeničnim vodom

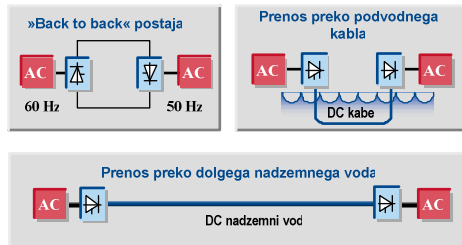
Figure 4: Comparison between the AC and HVDC line right-of-way width

Razmere so podobne tudi pri kablskih prenosih. Kabli za enosmeren prenos so bistveno cenejši od kablov za izmenični prenos. Poleg tega lahko z enosmernimi kabli prenašamo moč na velike razdalje, kar z izmeničnimi kabli zaradi visoke dodatne obremenitve z jalovim tokom pri razdaljah več kot 30 do 40 km brez dodatne vmesne kompenzacije ni mogoče. Enosmerne prenose zaradi tega pogosto uporabljajo za povezave s podvodnimi kabli. Če govorimo o prenosu prek kablov, je enosmeren prenos cenejši od izmeničnega pri razdaljah nad 50 km. V Evropi povezuje veliko takih vodov UCTE omrežje z omrežjem NORDEL in z Veliko Britanijo [4].

2.3 Aplikacije enosmernih prenosov

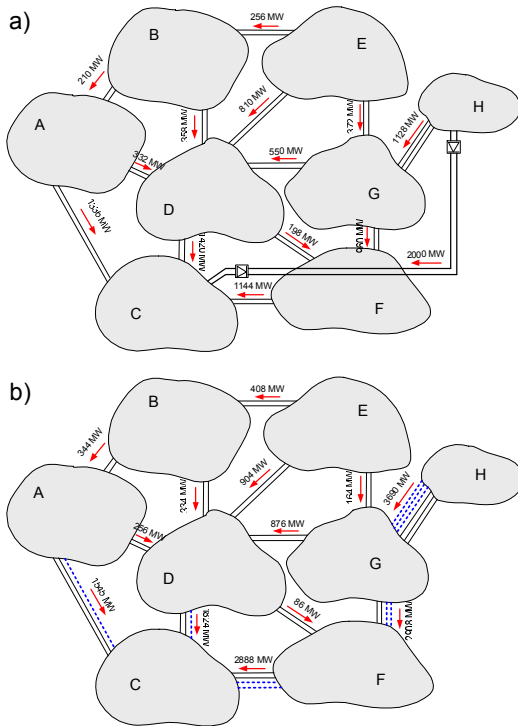
Slika 5 kaže tri glavne alternative enosmernih prenosov: "back-to-back", prenos s podvodnim kablom in prenos z

dolgim nadzemnim vodom. Poleg tega lahko enosmerni prenos uporabimo tudi s tremi ali celo več pretvorniškiimi postajami (multiterminal HVDC), vendar je število izvedb teh projektov še majhno.



Slika 5: Alternative enosmernih prenosov
Figure 5: HVDC alternatives

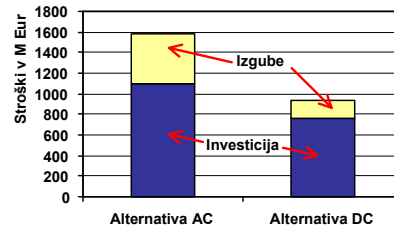
Enosmerne prenose čedalje več uporabljajo znotraj izmeničnih sistemov za povezavo med podsistemi in da se izognemo prenosu energije na velike razdalje skozi omrežje. Ekonomske in tehnične prednosti take integracije smo analizirali v študiji, narejeni na modelnem omrežju povezanih sistemov [5]. Podsistemi so povezani z interkonekcijami. Podobne strukture omrežij najdemo v Evropi, pa tudi drugod po svetu.



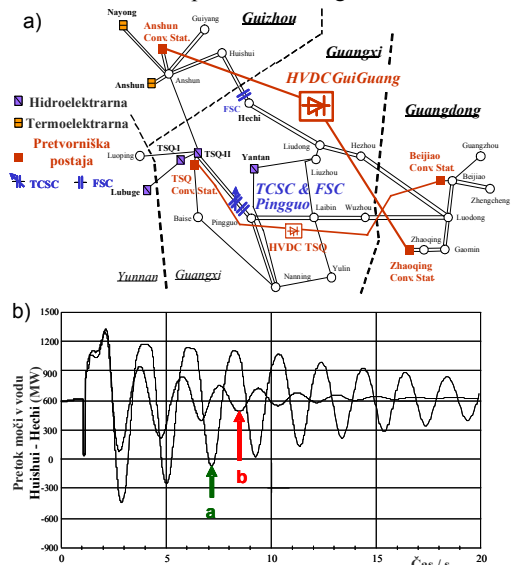
Slika 6: Prenos dodatnih 2000 MW v kompleksnem sistemu
a) alternativa z enosmernim prenosom
b) Prenos skozi ojačena omrežja
Figure 6: Transmission of additional 2000 MW in a complex system
a) Alternative with HVDC
b) Transmission via enhanced networks

Slika 6a prikazuje raziskano omrežje. Cilj je bil, prenašati dodatnih 2000 MW od podsistema H do deficitarnega podsistema C. V sliki je prikazan dodaten

enosmerni prenos med podsistemoma. Druga alternativa bi bila prenašati moč skozi obstoječe omrežje. Seveda bi morali v tem primeru povezave med omrežji in znotraj omrežij ojačiti. Dodatni daljnovodi, ki so potrebni pod pogoji primerljive zanesljivosti z alternativo enosmerne prenosa, so vrisani v sliki 6b. Ekonomski račun alternativ je pokazal, da je alternativa z enosmernim prenosom bistveno cenejša. Primerjava stroškov in izgub je prikazana na sliki 7.



Slika 7: Primerjava stroškov prenosnih alternativ v sliki 6
Figure 7: Comparison of costs between transmission alternatives presented in Fig. 6



Slika 8: Primer enosmernih projektov na Kitajskem
a) del študirane omrežja
b) nihanja moči v omrežju
Figure 8: Example of China HVDC projects
a) part of power system studied
b) power oscillations in the network

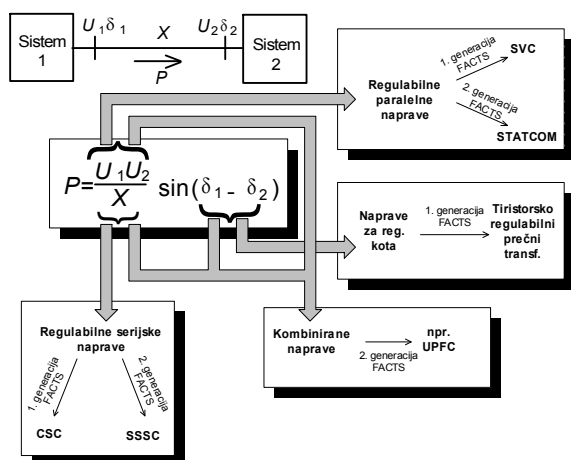
Enosmerni prenos lahko poleg prenosa moči podpre izmeničen sistem pri problemih dinamične stabilnosti. Dober primer za tak prenos sta dva velika projekta na Kitajskem. Slika 8 kaže konfiguracijo dela kitajskega omrežja z obema enosmernima prenosnima sistemoma, ki prenašata energijo na razdaljo približno 1000 km v okolico Guandong. Poleg direktnega prenosa od električnih central do območja porabe omogoča prenos Gui-Guang tudi dušenje dinamičnih nihanj v tem kompleksnem omrežju [5]. Slika kaže primerjavo nihanj brez (krivulja "a") in z (krivulja "b") upoštevanjem dušilne funkcije v enosmernem prenosu. Kot vidimo, enosmerni prenos močno duši nihanja.

3. Povečanje prenosne zmogljivosti EES z uporabo FACTS tehnologije

Čprav ima enosmerni prenos električne energije v nekaterih primerih prednost, se bo v prihodnosti kljub omejitvam (glej [2]) večina električne energije vendarle prenašala po izmeničnih sistemih. Ker gradnja novih vodov ne dosega večanja potreb po prenosu električne energije, se kot rešitev ponuja možnost povečanja prenosne zmogljivosti obstoječega prenosnega omrežja. Osnova za to pa je fizikalno gledano dinamično usmerjanje pretokov delovnih in/ali jalovih moči v najširšem pomenu. Tako je med drugim mogoče:

- razporediti pretoke moči, da se sprostijo ozka grla,
- zagotoviti ustrezne napetostne razmere v vseh obratovalnih pogojih in v skrajnem primeru preprečiti napetostni zlom,
- razširiti stabilno področje obratovanja EES glede na elektromehanska nihanja v sistemu.

Možnosti kontroliranega dinamičnega usmerjanja moči po omrežju dajejo t.i. naprave FACTS. Koncept FACTS temelji na elementih močnostne elektronike in je v svetu elektroenergetike nastal pred dobrimi dvajsetimi leti, vzporedno s samim razvojem močnostne



Slika 9: Regulacija moči v izmeničnem sistemu
Figure 9: Power-flow control in AC system

elektronike. Naprave FACTS imajo, odvisno od izvedbe in same lokacije v EES, lahko različne vloge (regulacija pretokov delovnih in/ali jalovih moči, uravnavanje napetostnega profila, reševanje problemov, povezanih s stabilnostjo, ...). Največji odliki sta hitrost odziva in možnost "hkratnega" zadovoljevanja različnih potreb. V zadnjem času pa se čedalje pogosteje omenjajo v povezavi s preusmerjanjem pretokov moči na novih oz. nastajajočih dereguliranih trgih električne energije.

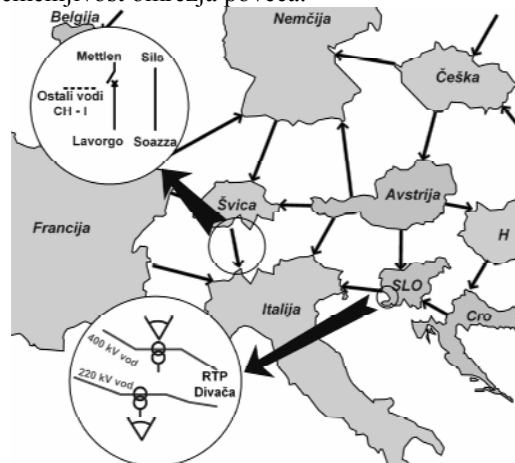
V bistvu dosežemo regulacijo pretokov delovnih moči bodisi s spreminjanjem amplitude napetosti in/ali prenosnih kotov in/ali reaktanc. Delitev naprav FACTS glede na njihov vpliv na veličine lahko v grobem obrazložimo z osnovno enačbo, ki opisuje prenos moči med dvema sistemoma po brez izgubnem vodu (slika 9).

Z vplivom na enega ali več parametrov naprave FACTS posredno vplivajo na pretok moči. Serijske naprave vplivajo pretežno na sistemsko reaktanco, paralelne naprave na napetost in naprave za fazni zamik na prenosni kot. Te delitve ni mogoče razumeti v strogem pomenu, saj veličine med seboj niso neodvisne.

Po drugi strani lahko naprave FACTS razdelimo glede na uporabljeno tehnologijo. Medtem ko naprave 1. generacije temeljijo na tehnologij klasičnih tiristorjev, izkoriščajo naprave 2. generacije polprevodniške elemente, s prisilno komutacijo. S stališča sistema je bistvena razlika med napravami različnih generacij v hitrosti odziva in v obratovalnih karakteristikah. Paralelne naprave FACTS, posebno statični var kompenzatorji (SVC) so že desetletja v uporabi. Inštaliranih je že blizu 1000 takih naprav v industriji in prenosnih sistemih. Serijski elementi FACTS se za zdaj uporabljajo le v posebnih primerih, kjer regulirajo prenosno moč in dušijo nihanja med omrežji.

3.1 Povečanje prenosne zmogljivosti EES z napravami FACTS v stacionarnem stanju

Teoretično mejo prenosa nekega EEO določajo termične obremenljivosti vodov. Ker v EEO niso vsi vodi hkrati enako relativno obremenjeni, lahko ob omejitve prenosa trčimo že bistveno prej. Seveda je pri tem treba upoštevati tudi merila sigurnosti (npr. kriterij n-1). Preusmerjanje pretokov moči od bolj k manj obremenjenim vodom lahko torej dejansko obremenljivost omrežja poveča.



Slika 10: Pretoki moči med državami srednje Evrope
Figure 10: Power-flows among central European countries

Kot primer si v grobem oglejmo razmere ob razpadu italijanskega EES septembra 2004 in hipotetično možnost njegove preprečitve z reguliranjem pretokov moči med Slovenijo in Italijo. Geografski položaj prikazuje slika 10. Zaradi padca drevesa je prišlo do izklopa 400 kV povezave med Švico in Italijo Mettlen–Lavorgo. Ker so se pretoki moči ob tem prerazporedili na vzporedne vode, je prišlo do termične preobremenitve enega od njih t.j. Sils–Soazza. Ko je po

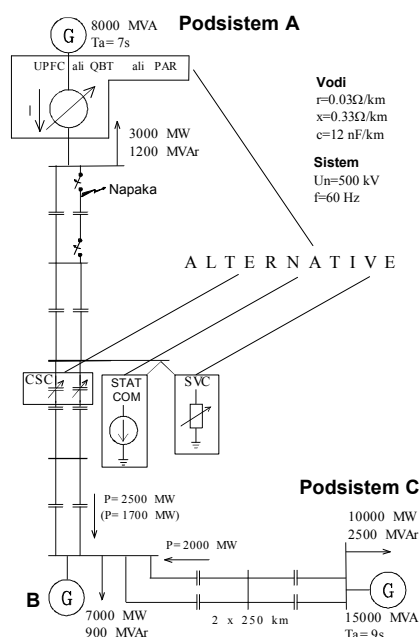
približno 25 minutah prišlo še do izklopa tega voda, se je začel kaskadni izklop Italije od preostalega omrežja UCTE, čemur je sledil razpad EES Italije. Obremenitev povezav med Slovenijo in Italijo pred razpadom je bila okrog 640 MW. Ker je termična obremenljivost teh povezav okrog 2200MVA, bi bilo mogoče povečati pretok po njih za vsaj 1100 MW, npr. s prečnima transformatorjema. V tem primeru bi se zmanjšal pretok v vodu Sils–Soazza za okrog 400 MW, kar bi lahko preprečilo izpad tega voda in morda celega EES Italije.

3.2 Večanje stabilnosti EES z napravami FACTS

Velikokrat narekujejo mejo prenosa električne energije dinamični pojavi, povezani s stabilnostjo sistema. Stabilnost lahko razdelimo na več tipov. V nadaljevanju predstavljamo učinek naprav FACTS na povečanje t.i. oscilatorne in tranzientne stabilnosti. V predstavljenih študijah stabilnosti smo simulacije izvedli s simulacijskim programom NETOMAC, stroji, njihovi vzbujalni sistemi in turbinska regulacija so bili modelirani detajlno, vodi kot serija Pi členov, naprave FACTS pa kot regulabilne reaktance, tokovni oz. napetostni viri ali kot kombinacija le-teh tako, da povzemajo lastnosti naprav.

3.2.1 Dušenje nihanj

V močno obremenjenih oz. šibkih sistemih lahko določajo omejitev prenosne zmogljivosti omrežja nihanja moči v omrežju. Govorimo o t.i. oscilatorni nestabilnosti. S tem problemom so soočena celotna omrežja ali deli le-teh. Probleme je mogoče reševati z modulacijo vzbujanja generatorjev (t.i. PSS), vendar v primeru koherentnih nihanj gruč generatorjev PSS ni učinkovit. Z napravami FACTS lahko ta nihanja uspešno dušimo in tako povečamo prenosno zmogljivost sistema.



Slika 11:
Sistem za študij učinkovitosti dušenja nihanj moči z napravami FACTS

Figure 11:
Power system for analysis of oscillation damping applying FACTS devices

V nadaljevanju demonstriramo učinkovitost dinamične regulacije moči na primeru testnega omrežja, ki je prikazano na sliki 11. Sestoji se iz treh podsistemov. Pri modeliranju smo upoštevali, da je del generatorjev v vsakem podsistemu opremljenih s PSS. Motnja v sistemu je enopolni zemeljski stik, ki mu sledi izklop voda. Brez dodatnih ukrepov je prenosna zmogljivost med sistemoma A in B 1700 MW. Približno pri tej moči prenosa postane sistem ob motnji nedušen. Večji prenosi imajo za posledico oscilatorno nestabilnost sistema. Z aktivnim dušenjem naprav FACS je moč mejo prenosa zvišati. Predpostavili smo zvišanje meje prenosa za 800 MW, t.j. na 2500 MW. Nazivne moči naprav, ki v teh razmerah zagotavljajo pozitivno dušenje so zbrane v tabeli 1. Ob tem je naj pripomnimo, da rezultatov ni mogoče posplošiti, pač pa so ti odvisni od parametrov in konfiguracije sistema.

CSC /MVA/	SVC /MVA/	STATCOM /MVA/	QBT /MVA/	PAR /MVA/	UPFC /MVA/
67	170	162	66	107	47

Tabela 1: Nazivne vrednosti naprav FACTS, ki zagotavljajo pozitivno dušenje sistema pri prenosu moči 2500 MW

Table 1: Ratings of FACTS devices which assure positive damping at 2500 mw power transfer

Kot se je izkazalo, je nazivna vrednost naprav, ki zagotavljajo v danem primeru povečanje prenosa moči za 800MW približno red velikosti manjša. Finančno lahko ocenimo investicijo [6] 4 do 10 €/MW dodatno prenesene moči (odvisno od naprave).

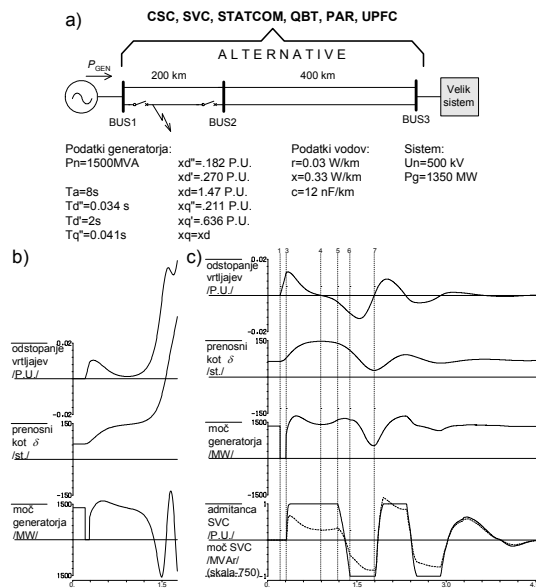
3.2.2 Povečanje tranzientne stabilnosti

Drug problem, povezan s prenosom velikih moči med centri proizvodnje in centri porabe, je t.i. tranzientna stabilnost. Sistem je tranzientno stabilen, če ostane v sinhronizmu tudi po večji napaki, med katero je bilo v sistemu ali njegovem delu znatno porušeno ravnotežje med proizvedeno in odvedeno električno energijo. Kot osnovo za študij vzemimo sistem, v katerem proizvodni center, ponazorjen z generatorjem, prek prenosnega koridorja napaja center porabe. Trajanje napake (ki ji sledi izklop voda) v vodu blizu generatorja, po kateri sistem še ravno ohrani stabilnost, znaša 75 ms. Če v tem času ni mogoče odstraniti motnje, je za ohranitev stabilnosti treba bodisi zmanjšati prenos moči ali pa povečati tranzientno stabilnost sistema. V predstavljeni študiji smo študirali vpliv različnih naprav FACTS na tranzientno stabilnost. Slika 12 prikazuje razmere ob napaki 100 ms [7]. Nazivne vrednosti naprav, ki bi zagotovile stabilnost sistema, podajamo v tabeli 2.

CSC /MVA/	SVC /MVA/	STATCOM /MVA/	QBT /MVA/	PAR /MVA/	UPFC /MVA/
535	585	470	522	1000	108

Tabela 2: Nazivne vrednosti naprav FACTS, ki zagotavljajo tranzientno stabilnost pri napaki 100 ms

Table 2: Ratings of FACTS devices which assure transient stability at a 100 ms fault



Slika 12: Povečanje tranzientne stabilnosti s FACTS;

- shema testnega sistema
- napaka 100 ms brez naprav FACTS
- napaka 100 ms, uporaba SVC - oscilogrami

Fig. 12: Transient stability enhancement when applying FACTS;

- test system scheme.
- 100 ms fault without FACTS action
- 100 ms fault with SVC action – oscillograms

4. Sklep

Razvoj močnostne elektronike je omogočil tehnične rešitve, ki so alternativa obstoječim "klasičnim" prenosnim EEO. Prvi sklop rešitev je prenos energije z enosmernimi sistemi, drugi pa usmerjanje pretokov moči s pomočjo naprav FACTS.

Analiza razvoja enosmernih prenosov kaže, da je trend njihove rasti približno eksponenten, instalirana moč se v povprečju podvoji v približno 15 letih, kar je pričakovati tudi za prihodnjih 15 let. Glavne prednosti te tehnologije pred izmenično so zlasti kontrola pretokov moči, možnost povezave asinhrono delujočih sistemov, manjši posegi v okolje (ožji koridorji), v določenih primerih nižja cena, možnost prenosa prek dolgih kablov. Predstavljeni študiji na modelnem zazankanem sistemu in na konkretnem delu omrežja demonstrirata prednosti te tehnologije pri prenosu večjih količin energije skozi kompleksna omrežja (bistveno cenejša rešitev za podobno zanesljivost je HVDC) in pri dušenju sistema.

V izmeničnih sistemih je mogoče izboljšati obratovalne razmere in približati prenosne zmogljivosti EEO njegovi termični obremenljivosti z uporabo FACTS tehnologije, ki omogoča dinamično regulacijo pretokov delovnih in/ali jalovih moči. V stacionarnih razmerah je tako mogoče razbremeniti močno obremenjene prenosne poti. Analiza vpliva reguliranja pretokov moči med Slovenijo in Italijo je pokazala, da

bi bilo mogoče v razmerah pred razpadom italijanskega EES leta 2004 tako razbremeniti preobremenjen vod med Italijo in Švico, katerega odklop je imel bistveno vlogo pri omenjenem razpadu.

Možnost dinamične regulacije pretokov moči z napravami FACTS ponuja rešitve za EES, v katerih predstavljajo omejitveni faktor prenosa stabilnostni problemi. Izkazalo se je, da so pri dušenju nihanj, kakor tudi pri širitvi področja tranzientne stabilnosti najučinkovitejše serijske naprave FACTS 2. generacije.

5. Literatura

- [1] D. Povh, R. Mihalič: Možnosti in omejitve prenosa električne energije na dolge razdalje 1. del – Razvoj in vloga prenosa električne energije v elektroenergetskih sistemih, Elektrotehniški Vestnik – Sprejeto v objavo 2006.
- [2] R. Mihalič, D. Povh.: Možnosti in omejitve prenosa električne energije na dolge razdalje 2. del – Prenos energije na dolge razdalje z izmeničnim prenosnim sistemom, Elektrotehniški Vestnik – Sprejeto v objavo 2006.
- [3] Erche, M., Povh, D.: Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung ETG-Fachbericht 26 - Neue Wege in der Energietechnik – VDE-Kongreß 1988
- [4] Povh, D., Retzmann, D.: Perspectives of Power System Interconnections, IERE Conference, San Jose, Costa Rica, November 2003
- [5] D. Povh a. al.: Advantages of Large AC/DC System Interconnections, CIGRE Report B4-304, Paris 2006
- [6] Cigre TF38-01-06: Load Flow Control in HV Systems Using FACTS Controllers, October 1995.
- [7] Flexible ac transmission systems (FACTS) / edited by Yong Hua Song and Allan T. Johns. – London : IEE, cop. 1999. – (IEE power and energy series ; Vol. 30).

Dušan Povh (1935) je diplomiral na Univerzi v Ljubljani doktoriral na Tehnični univerzi v Darmstadtu (Nemčija). Je tudi profesor na Univerzi v Ljubljani. Dolga leta je bil na vodilnih položajih pri Siemensu AG v Nemčiji, sedaj pa je svetovalec. Področje delovanja obsega analizo EES, HVDC in FACTS. Je "Fellow Member" IEEE, bil pa je vodja CIGRE Study Committee on HVDC and FACTS. Pri CIGRE je bil imenovan za "Honorary Member" V ZDA je prejel nagrado Uno Lamm leta 2001, in "FACTS Award" leta 2003.

Rafael Mihalič (1961) je diplomiral, magistriral in doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko in računalništvo v Ljubljani. Po diplomi je postal asistent na omenjeni fakulteti. Med letoma 1988 in 1991 je bil zaposlen pri Siemensu AG v Erlangu. Trenutno je profesor na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Je član CIGRE, član IEEE in predsednik ŠK B4 SLOKO CIGRE. Področje delovanja vključuje predvsem analizo elektroenergetskih sistemov in naprav FACTS.