

## UPRAVLJANJE TOKOVIMA AKTIVNIH SNAGA POMOĆU STATIČKIH TRANSFORMATORA ZA REGULACIJU UGLA

Dragan P. Popović

*Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd*

**Sadržaj:** U radu se izlaže jedna efikasna brza dekuplovana metoda za upravljanje tokovima snaga, odnosno metoda za automatsko podešenje statičkih transformatora za regulaciju ugla za zadate iznose tokova snaga na izabranim dalekovodima. Efekti ovih transformatora su predstavljeni preko injekcionog modela, uz odgovarajuće proširenje konvencionalnog modela tokova snaga. Osim toga, upravljanje tokovima snaga pomoću ovih transformatora modelovano je odgovarajućim dodatnim jednačinama. Za rešavanje tako formiranog modela upravljanja snagama, razvijena je specijalna brza dekuplovana procedura. Visoka numerička efikasnost i jednostavnost razvijene procedure utvrđena je na primeru realne interkonekcije koju sačinjavaju elektroenergetski sistemi Srbije i Crne Gore, Rumunije, Bugarske, Makedonije, Grčke i Albanije (Druga UCTE sinhrona zona).

**Ključne reči:** statički transformator, regulacija ugla, FACTS, upravljanje snagama, metoda, Druga UCTE sinhrona zona

### 1. UVOD

Kao što je poznato širokoj stručnoj javnosti, elektronski, tiristorski upravljani statički transformatori za regulaciju ugla (SPST - Static Phase Shifting Transformer) pripadaju širokoj familiji savremenih dostignuća energetske elektronike, za koju postoji već ustaljeni termin - FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) kontroleri [1,2]. Dakle, akronim FACTS podrazumeva široki krug posebno koncipiranih kontrolera, koji su u osnovi namenjeni povećanju fleksibilnosti funkcionisanja i upravljanja elektroenergetskih sistema (EES-a), kroz upravljanje osnovnim veličinama koje karakterišu prenos električne snage i energije naizmničnom strujom: uglovima, modulima napona i impedansama.

Nesumnjiva atraktivnost, široke mogućnosti i izazovi koje pružaju FACTS kontroleri, a koji se i dalje intenzivno razvijaju i usavršavaju, uticali su na veliko interesovanje i stručnjaka iz elektroprivreda. U prvom redu, u pogledu utvrđivanja realnih mogućnosti dometa i efekata njihove neposredne praktične primene, u kontekstu skoro svih segmenata planiranja, pogona i upravljanja EES-a (tokovi snaga i naponske prilike, statička sigurnost, ekonomski dispečing, odnosno optimizacija pogona, statička i tranzijentna statabilnost, odnosno prigušenje oscilacija i dr.).

Poslednjih godina, procesi liberalizacije tržišta električne energije i konsekvntno tome, restrukturiranje elektroprivrednih kompanija (kao jednom od najznačajnijih, a reklo bi se i najsloženijih i najdelikatnijih segmenata procesa reformi energetske sektora) uneli su veoma širok spektar novih metodoloških i praktičnih aspekata, a naročito u pogledu novih zahteva i izazova u planiranju, eksploataciji i upravljanju, sada ne samo pojedinih elektroenergetskih sistema, već i elektroenergetskih interkonekcija u kojima se oni nalaze. U pomenutim procesima liberalizacije tržišta

električne energije, problematika sigurnosti, odnosno pitanje utvrđivanja graničnih prenosnih kapaciteta u okviru realnih interkonekcija [3, 4], kao i pitanja upravljanja zagušenjima (congestion management) [5, 6], dobijaju prvorazredni praktični značaj. Tako, na primer, u dokumentu [7], koji se odnosi na evropsku praksu, u cilju povećanja prenosnih kapaciteta na kritičnim deonicama, odnosno u cilju eliminacije "zagušenja", preporučuje se upotreba ovih serijskih FACTS kontrolera, kao tzv. "soft measures", koja ne zahteva značajnije investicije.

Ovaj rad bavi se statičkim transformatorima za regulaciju ugla. Oni pripadaju kategoriji tzv. serijskih FACTS kontrolera tokova snaga, jer imaju mogućnost da upravljaju tokovima snaga (i to, neposredno, tokovima aktivnih snaga). Pri tome, praktično se ne menjaju uspostavljeni "vozni redovi" izvora (sem minimalnih promena, koje su uslovljene razlikama u gubicima aktivnih snaga, nastalih usled promena tokova snaga), kao i postojeća topologija električne mreže.

U prošlosti razvijen je niz procedura za podešenje ugla regulacije SPST, odnosno procedura za utvrđivanje njihovih efekata. Priložene u ovom radu reference [8-13] su samo manji deo stvarno velikog skupa objavljenih radova iz ove oblasti.

Naravno, moglo bi da se postavi pitanje, koje je već bilo postavljeno u radu [14], zašto se ovi FACTS kontroleri tretiraju u radovima domaćih autora, kad njih nema u EES Srbije i njegovom neposrednom okruženju? To je tačno, za sada ih nema. Ali pitanje je šta će biti u budućnosti, kada bude formirano Regionalno tržište električne energije (REM) u jugoistočnoj Evropi, a pogotovu kada ono intenzivno "proradi" (proces koji je započet potpisivanjem Deklaracije o namerama [15] i Memoranduma o razumevanju [16]).

Takođe, nije isključeno da će se, u uslovima povezivanja Druge UCTE sinhronne zone sa glavnim delom interkonekcije UCTE i njenim širenjem na Istok i pojavi većih tranziti snaga u dužem vremenskom trajanju, pokazati tehnoeкономска opravdanost ugradnje ovih kontrolera na najpogodnijim lokacijama. Pri tome će se svakako respektovati do sada stečena pozitivna iskustva Evrope u primeni ovih kontrolera, apostrofirana u referenci [7].

U ovom radu daje se razvoj i praktična primena jedne metode za upravljanje tokovima snaga, odnosno metode za automatsko podešenje ugla regulacije SPST, za unapred zadate tokove aktivnih snaga na izabranim dalekovodima. Pri tome, efekti SPST se predstavljaju preko odgovarajućeg inekcionog modela, uz respektovanje i konduktansi elementa (dalekovoda) na kojima je on priključen [14, 17].

Za rešavanje formiranog modela upravljanja tokovima snaga razvijena je jedna jednostavna, brza i pouzdana metoda, sa razdvajanjem varijabli tokom pojedine iteracije. Ta jednostavnost direktno je proizašla iz sačuvane simetričnosti matrice admitansi, što je omogućilo i simetričnost odgovarajućih submatrica koeficijenata. Takođe, jednostavnost i brzina rešavanja proizilaze iz činjenice da elementi submatrica koeficijenata imaju konstantne vrednosti, za nepromenjenu topologiju, a što nije ugrozilo željenu efikasnost. Pomenute karakteristike razvijene metode utvrđivane su na primeru postojeće elektroenergetske interkonekcije na prostorima Balkana, odnosno na primeru Druge UCTE sinhronne zone.

## 2. LISTA UPOTREBLJENIH OZNAKA

N	ukupan broj, odnosno oznaka skupa svih čvorova EES-a
NG	ukupan broj, odnosno oznaka skupa generatorskih čvorova
NL	ukupan broj, odnosno oznaka skupa svih "neproizvodnih" čvorova (NL= N-NG)

NC	oznaka skupa čvorova EES-a na kojima su priključeni statički transformatori za regulaciju ugla (tzv. serijski FACTS kontroleri tokova snaga), modelovanih preko odgovarajućih injektiranih snaga
NCU	ukupan broj kontrolera, odnosno statičkih transformatora za regulaciju ugla (NCU = NC/2)
NCL	ukupan broj, odnosno oznaka skupa dalekovoda na kojima se upravljaju tokovi aktivnih snaga
$\underline{t} = t e^{j\phi}$	kompleksni prenosni odnos statičkog transformatora za regulaciju ugla (SPST)
t	moduo kompleksnog prenosnog odnosa ( $t = 1/\cos \phi$ )
$\phi$	ugao regulacije transformatora za regulaciju ugla
$g_{km}, b_{km}$	konduktansa i susceptansa elemenata "k-m"
$g_{ij}, b_{ij}$	konduktansa i susceptansa elemenata "i-j"
$X_{km}$	reaktansa elementa "k-m"
$\theta_{km}$	razlika uglova fazora napona na početku i kraju elemenata "k-m"
$\theta_j$	razlika uglova fazora napona na početku i kraju elemenata "i-j"
$P_{ci}^{SP}$	zadati iznos toka aktivne snage ( $i \in NCL$ )
$P_{ckm}$	aktuelna vrednost toka snage na elementu (dalekovodu) "k-m" ( $k, m \in NC$ )
$P_{Gi}, Q_{Gi}$	aktivna i reaktivna snaga generatora
$P_L(V_i), Q_L(V_i)$	aktivna i reaktivna snaga potrošača kao složena nelinearna funkcija od napona
$P_i, Q_i$	aktivna i reaktivna snaga injektiranja
k, l	subiteracioni indeksi

### 3. FORMULACIJA METODE ZA UPRAVLJANJE TOKOVIMA SNAGA

#### 3.1. Generalno

Generalna matematička formulacija razmatranog problema upravljanja tokova snaga je da se odredi vektor upravljačkih varijabli  $u$ , koji će zadovoljiti sledeća dva sistema jednačina:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{F}^{SP} \quad (1)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{d}) = \mathbf{0} \quad (2)$$

uz zadovoljenje uslova :

$$\mathbf{u} \in \mathbf{U} \quad (3)$$

U sistemima jednačina (1) i (2), veličina  $\mathbf{x}$  je vektor stanja, a veličina  $\mathbf{u}$  je vektor upravljačkih varijabli (u konkretnom slučaju to je  $\phi$  - ugao regulacije statičkih transformatora za regulaciju ugla) u opsegu dozvoljenih, odnosno mogućih vrednosti  $\mathbf{U}$  ( $-30^\circ \leq \phi < 30^\circ$ ). Veličina  $\mathbf{d}$  je vektor tzv. zadatih ("demand") varijabli.

Upravljanje tokovima aktivnih snaga po elementima (dalekovodima), na kojima su ugrađeni statički transformatori za regulaciju ugla, modeluje se posredstvom sistema jednačina oblika (1). U njima, veličina  $\mathbf{F}^{SP}$  je vektor unapred zadatih tokova aktivnih snaga po odabranim dalekovodima.

Sistem jednačina oblika (2) je merodavan za ravnotežno stanje, odnosno to su jedanačine balansa snaga u čvorištima razmatrane interkonekcije. Pri tome, potrebno je napomenuti da je u ovom radu stacionarno stanje modelovano posredstvom jednačina tzv. konvencionalnih tokova snaga.

Međutim, moguće je umesto primenjenog konvencionalnog modela tokova snaga operisati i sa tzv. nestandardnim modelima tokova snaga (na primer sa modelima tokova snaga u karakterističnim postdinamičkim kvazistacionarnim stanjima, prisutnim u metodologiji, odnosno računarskom programu STATIC [18]), što će biti predmet posebnog rada, koji je u pripremi.

### 3.2. Injekcioni model statičkog transformatora za regulaciju ugla

Do sada, kada je u pitanju sam način modelovanja transformatora sa kompleksnim prenosnim odnosom, odnosno SPST, prisutna su dva različita prilaza. Jedan, konvencionalni, koji je baziran na odgovarajućoj modifikaciji matrice admitansi čvorova EES-a, nastaloj inkorporiranjem zamenske šeme SPST u takvu šemu elementa (dalekovoda) na čijem početku je instaliran.

Kao neposredna posledica takvog načina modelovanja, matrica admitansi čvorova postaje nesimetrična i funkcija ugla regulacije  $\phi$ , sa poznatim posledicama. Uz znatno povećanje memorijskih zahteva, povećava se i vreme simulacija u odnosu na proračune tokova snaga EES-a bez ovih kontrolera. Takva iskustva stečena su i u okviru radova [19, 20], u kojima se efekat SPST određivao na bazi primene poznatog računarskog programa CLF-OPF [21], u kome je prisutan ovaj konvencionalni prilaz modelovanju SPST.

Drugi prilaz modelovanju efekata SPST baziran je na odgovarajućem modelu injektiranih snaga u relevantnim čvorovima, a koji ne ugrožava prirodnu simetričnost matrice admitansi EES-a.

U radu [8] formiran je jedan uprošćen inkrementalni model SPST koji se odnosi samo na injektirane aktivne snage, uz zanemarenje konduktansi elementa na kome se on nalazi. Nešto složeniji prilaz dat je u [9], ali i dalje je bila samo aktivna snaga u pitanju, uz takođe, uvažavanje samo susceptansi elemenata na kome su oni priključeni.

U radovima [10,11,12], razvijeni model statičkog transformatora za regulaciju ugla obuhvata i injektiranu reaktivnu snagu, ali i dalje uvažavaju se samo susceptanse elemenata na kojima su instalirani ovi kontroleri.

Međutim, kako je to bilo pokazano u radu [17], ako se želi dostizanje visoke preciznosti određivanja svih efekata serijskih kontrolera tokova snaga, uključujući i onaj osnovni – upravljanje tokovima aktivnih snaga, neophodno je bilo da se uvaži i uticaj konduktansi kod formiranja izraza za injektirane snage (to je posebno značajno u slučajevima srazmerno malih dužina dalekovoda).

U tom cilju, proširen je model injektiranih snaga, izložen u [11], obuhvatajući uticaj konduktansi elemenata na kojima su ugrađeni ovi kontroleri. U uslovima uvažavanja i konduktansi, efekti SPST, priključenog na početku elementa "k-m", kvantifikuju se preko sledećih relacija [17]:

$$P_{ck} = -g_{km} V_k^2 \tan^2 \phi - g_{km} V_k V_m \tan \phi \sin \theta_{km} + b_{km} V_k V_m \tan \phi \cos \theta_{km} \quad (4)$$

$$Q_{ck} = g_{km} V_k \tan \phi \cos \theta_{km} + b_{km} V_k^2 \tan^2 \phi + b_{km} V_k V_m \tan \phi \sin \theta_{km} \quad (5)$$

$$P_{cm} = -g_{km} V_k V_m \tan \phi \sin \theta_{km} - b_{km} V_k V_m \tan \phi \cos \theta_{km} \quad (6)$$

$$Q_{cm} = -g_{km} V_k V_m \tan \phi \cos \theta_{km} + b_{km} V_k V_m \tan \phi \sin \theta_{km} \quad (7)$$

$k, m \in \text{NC}$

Dakle, prisustvo SPST na početku elementa "k-m" valorizuje se uvođenjem injektiranja u njegovim krajnjim čvorovima "k" i "m". Pri tome, evidentno je da ovaj izvedeni injekcioni model SPST ne ugrožava simetričnost matrice admitansi čvorova, što je svakako veoma značajno u praktičnom smislu sa aspekta algoritmovanja, potrebnog vremena obavljanja simulacija i zahteva za memorijom računara.

Dalje, u kontekstu modelovanja SPST preko injektiranih snaga, aktuelna vrednost toka aktivne snage na elementu "k-m", na čijem je početku instaliran SPST, određuje se preko sledeće relacije:

$$P_{ckm} = g_{km} t^2 V_k^2 - t V_k V_m [g_{km} \cos(\theta_{km} + \phi) + b_{km} \sin(\theta_{km} + \phi)] \quad (8)$$

$k, m \in \text{NC}$

### 3.3. Formulacija metode za upravljanje tokovima aktivnih snaga

Saglasno generalnoj formi modela upravljanja tokovima aktivnih snaga, datog preko sistema jednačina oblika (1) i (2), i saglasno prethodno datom injekcionom modelu SPST, aktuelne su sledeće jednačine balansa:

$$\Delta P_{ci} = P_{ci}^{SP} - P_{ckm} = 0, \quad i \in \text{NCL}, k, m \in \text{NC} \quad (9)$$

$$\Delta P_i = P_{Gi} - P_{Li}(V_i) - P_i = 0 \quad (10)$$

$$\Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li}(V_i) - Q_i = 0, \quad i \in \text{N/NC} \quad (11)$$

$$\Delta P_i^C = P_{Gi}^C - P_{Li}(V_i) - P_i - P_{ci} = 0 \quad (12)$$

$$\Delta Q_i^C = Q_{Gi}^C - Q_{Li}(V_i) - Q_i - Q_{ci} = 0 \quad i \in \text{NC} \quad (13)$$

Veličine  $P_i$  i  $Q_i$  su injektirane aktivne i reaktivne snage u čvoru "i", koje, koristeći se polarnim koordinatama, imaju sledeći poznati oblik:

$$P_i = g_{ii} V_i^2 - V_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (14)$$

$$Q_i = -b_{ii} V_i^2 - V_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (15)$$

Jednačine oblika (9), kojih ima NCL, odnosno onoliko koliko ima vodova sa kontrolerima, na kojima se unapred specificiraju željeni tokovi aktivnih snaga, odgovaraju generalnoj formi upravljanja koja je data preko sistema jednačina (1).

Jednačine (10) i (11) (važe za krajnja čvorišta elemenata bez SPST), odnosno jednačine (12) i (13) (važe za krajnja čvorišta elemenata sa SPST) su tzv. jednačine balansa snaga, koje odgovaraju generalnoj formi sistema jednačina (2).

Na taj način, opšta formulacija metode za upravljanje tokovima aktivnih snaga pomoću SPST svodi se na *jedinstveni sistem nelinearnih algebarskih jednačina* (sačinjavaju ga jednačine oblika (9) – (13)), u kojima figurišu sledeće *dve grupe nepoznatih varijabli*:

- vektor upravljačkih varijabli -  $\phi$  dimenzije NCL

- vektor stanja koji sadrži subvektore -  $\theta$  i  $V$  dimenzija  $(N-1)$  i  $NL$ , respektivno,  
 Drugim rečima, potrebno je da se odrede elementi vektora upravljanja  $\phi$  (uglovi regulacije SPST, odnosno kontrolera tokova snaga, u okviru prethodno pomenutih dozvoljenih granica  $U$ ) tako da jednačine specificiranih (upravljanih) tokova aktivnih snaga (9) i jednačine balansa snaga (jednačine (10)-(11), odnosno (12)-(13)) budu simultano zadovoljene. Pri tome treba napomenuti da svih prisutnih NCU kontrolera ne moraju da budu "aktivno uključeni" u upravljanje tokovima aktivnih snaga, odnosno važi sledeći generalni odnos:

$$NCL \leq NCU \quad (16)$$

Posebni slučaj prethodno date opšte formulacije upravljanja tokovima snaga je slučaj kada je  $NCL = 0$ . To je slučaj kada prisutnih NCU kontrolera nisu u tzv "aktivnoj funkciji", odnosno kada oni tokom proračuna tokova snaga ne menjaju unapred podešenu vrednost ugla regulacije  $\phi$ . Praktično, tu se više ne radi o direktnom upravljanju tokovima aktivnih snaga (dostizanje unapred zadatih vrednosti). Tada se preko datog modela samo određuju neposredni efekti kontrolera na tokove snaga, koji imaju fiksnu vrednost podešenih uglova regulacije  $\phi$ .

Ekstremni slučaj je kada je  $NCU = 0$  (slučaj kada u razmatranoj interkonekciji nema instaliranih SPST, odnosno kontrolera tokova snaga). Naravno, u tom slučaju, prethodno dati model bio bi u funkciji samo proračuna konvencionalnih tokova snaga.

### 3.4. Formulacija metode rešavanja formiranog modela upravljanja tokovima snaga

Sasvim je sigurno da se problem proračuna tokova snaga u elektroenergetskim interkonekcijama, u kojima su transformatori sa kompleksnim prenosnim odnosima predstavljani preko odgovarajućih modela injektiranih snaga, može uspešno da rešava primenom poznate metode Newton-Raphson-a [22], imajući u vidu njene pouzdane karakteristike kvadratne konvergencije. O tome najbolje govore rezultati izloženi u radu [12].

Međutim, sam način modelovanja SPST pružao je posebni izazov u pogledu traganja za jednostavnijim, ali i dalje efikasnim tehnikama rešavanja, uz respektovanje činjenice da elementi matrice admitansi čvorova EES-a ostaju nepromenjeni, uz očuvanje njene početne simetrije.

U radovima [17, 23], koji su se bavili injekcionim modelima tzv. serijskih FACTS kontrolera, izloženi su razvoji brzih postupaka sa razdvajanjem varijabli tokom iterativne procedure. Ti postupci su se odnosili na određivanje tokova snaga u uslovima statičkih stanja [17] i uslovima kratkotrajnih i dugotrajnih dinamičkih procesa u EES [23].

Razvoj ovih tehnika rešavanja modela tokova snaga u pomenutim stanjima, pošao je od oblika rešenja koji daje primena metode Newton-Raphson-a [22] na odgovarajuće jednačine balansa snaga. Dalje, polazeći od dobijenog oblika rešenja, uveden je niz opravdanih uprošćenja i pretpostavki kod formiranja odgovarajućih submatrica koeficijenata. Uvedena uprošćenja i pretpostavke su bili samo u kontekstu pojednostavljenja same tehnike rešavanja (jer je reč samo o odgovarajućim modifikacijama matrica Jakobijana), a ne samog modela tokova snaga koji je sačuvao svoju autentičnost. Ona su pokazala svoju opravdanost u analizama statičkih stanja [17], u analizama karakterističnih postdinamičkih kvazistacionarnih stanja [14] i u analizama kratkotrajnih i dugotrajnih dinamičkih procesa [23].

U slučaju problema upravljanja tokovima snaga sa kojim se bavi ovaj rad, novi momenat je prisustvo jednačina oblika (9), a koje moraju da budu simultano zadovoljene zajedno sa jednačinama oblika (10) i (11), odnosno (12) i (13).

Analogno prethodno rečenom, i u ovom slučaju se startuje sa oblikom rešenja koji daje primena metode Newton-Rhpsona na jednačine balansa (9)–(13). Zatim, isto kao kod razvoja prethodno pomenutih procedura, polazeći od dobijenog oblika rešenja, uvodi se niz opravdanih uprošćenja i pretpostavki kod daljeg formiranja odgovarajućih submatrica koeficijenata. Kao će se to videti u narednom izlaganju, to je urađeno isključivo u cilju pojednostavljenja same tehnike rešavanja, pri čemu formirani model upravljanja tokovima aktivnih snaga pomoću SPST zadržava svoju autentičnost.

U tom cilju, najpre se zanemaruje, tokom pojedine iteracije, uticaj promene napona na aktivne snage, kao i uticaj promene ugla na reaktivne snage. Time odgovarajuće submatrice u matrici Jakobijana postaju nula matrice, odnosno izvršeno je rasprezanje varijabli tokom pojedine iteracije. Takođe, zanemaruje se uticaj karakteristika potrošača na odgovarajuće elemente Jakobijana, odnosno submatrica koeficijenata.

Sledeće uvedeno uprošćenje (ali samo kod formiranja matrica koeficijenata, a ne kod određivanja injektiranih snaga) proizilazi iz uobičajenog odnosa konduktansi i susceptansi u realnim visokonaponskim mrežama. Taj odnos opravdava uvođenje sledećeg uprošćenja:

$$g_{ij} \approx 0; g_{ii} \approx 0 \quad (17)$$

Dalje, zanemaruju se otočni elementi u susceptansi  $b_{ii}$ , odnosno:

$$b_{ii} \approx \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N b_{ij} \quad (18)$$

Zatim, u submatricama koeficijenata za aktivnu snagu za module napone se usvaja nominalna vrednost, odnosno  $V_n = 1$  r.j.

Kao rezultat uvedenih uprošćenja i pretpostavki, formirajući vektore debalansa  $\Delta P^c/V$ ,  $\Delta P_c/V$  i  $\Delta Q^c/V$  po analogiji sa [24], dobijaju se sledeća dva sistema raspregnutih jednačina:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^c/V \\ \Delta P_c/V \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} B'_c & B'_{p\phi} \\ B'_{p\phi} & B'_\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \Theta \\ \Delta \phi \end{bmatrix}^{k+1} \quad (19)$$

$$\Delta Q^c/V^l = B'_c \Delta V^{l+1} \quad (20)$$

Shodno sprovedenom postupku formiranja ovih sistema jednačina, elementi submatrice koeficijenata  $B'_c$  i  $B''_c$ , za čvorove u kojima se ne nalaze SPST imali bi oblik:

$$b'_{cii} = -b_{ii}; b'_{cij} = b_{ij} \quad (21)$$

$$b''_{cii} = -b''_{ii}; b''_{cij} = b_{ij} \quad (22)$$

$i, j \in N/NC$

Respektujući prisustvo SPST čiji efekti su obuhvaćeni preko modela injektiranih snaga (4)-(7), odgovarajući elementi submatrice koeficijenata  $B'_c$  i  $B''_c$  razlikovali bi se u odnosu na prethodno date elemente, samo u onim dijagonalnim i van dijagonalnim elementima, koji odgovaraju čvorovima na kojima su priključeni ovako modelovani kontroleri.

U slučaju SPST, ugrađenog u grani "k" i "m", odgovarajući dijagonalni i van dijagonalni elementi matrica  $B'_c$  i  $B''_c$  imali bi oblik :

$$b'_{ckk} = -b_{kk} - b_{km} \tan \phi \sin \theta_{km}; b'_{cmm} = -b_{mm} + b_{km} \tan \phi \sin \theta_{km} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} b''_{ckk} &= -b_{kk} + 2b_{km} \tan^2 \phi + b_{km} \tan \phi \sin \theta_{km}; \\ b''_{cmm} &= -b_{mm} + b_{km} \tan \phi \sin \theta_{km} \end{aligned} \quad (24)$$

$$b'_{ckm} = b_{km} - b_{km} \tan \phi \sin \theta_{km}; b'_{cmk} = b_{mk} - b_{mk} \tan \phi \sin \theta_{km} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} b''_{ckm} &= b_{km} + 2b_{km} \tan^2 \phi + b_{km} \tan \phi \sin \theta_{km}; \\ b''_{cmk} &= b_{mk} + b_{km} \tan \phi \sin \theta_{km} \end{aligned} \quad (26)$$

$k, m \in NC$

Takođe, u slučaju SPST, ugrađenog na početku grane "k" i "m", ali u kojoj se vrši *i* upravljanje tokom aktivne snage, odgovarajući elementi submatrica  $B'_p\theta$  i  $B'_p\phi$  imali bi oblik :

$$b'_{p\theta_{ki}} = b_{km} \cos(\theta_{km} + \phi) \quad (27)$$

$$b'_{p\theta_{mi}} = b_{km} \cos(\theta_{km} + \phi) \quad (28)$$

$$b'_{p\phi_{ki}} = -b_{km} \cos(\theta_{km} + \phi) \quad (29)$$

$$b'_{p\phi_{mi}} = b_{km} \cos(\theta_{km} + \phi) \quad (30)$$

$i \in NCL, k, m \in NC$

Submatrica  $B'\phi$  ima samo dijagonalne elemente sledećeg oblika:

$$b'\phi_{ki} = -b_{km} \cos(\theta_{km} + \phi) \quad (31)$$

$i \in NCL, k, m \in NC$

Na taj način, za rešavanje formulisanog problema upravljanja tokovima aktivnih snaga operisalo bi se sa sistemima raspregnutih jednačina (19) i (20), ali kod kojih,



striktno gledano, saglasno datim izrazima (23) – (31), svi elementi odgovarajućih submatrica koeficijenata ne bi imali konstantne vrednosti.

Razlog za to leži u činjenici da su odgovarajući dijagonalni i van dijagonalni elementi funkcija ugla regulacije SPST. Takođe, oni su i funkcija razlike uglova fazora napona u čvorištima njihovog priključka, odnosno razlike uglova na krajevima elemenata (dalekovoda), na kojima su ugrađeni ovi serijski FACTS kontroleri tokova snaga.

Međutim, analizirajući navedene izraze (23) - (31), uočavaju se mogućnosti za *uvođenje daljih uprošćenja*.

Tu su u prvom redu imaju u vidu realni opsezi ugla regulacije kontrolera koji se susreću u praksi ( $-15^\circ \text{el} < \phi < +15^\circ \text{el}$ ). Takođe, dalja uprošćenja kod formiranja submatrica koeficijenata našla su uporište u uobičajenim vrednostima razlike uglova fazora napona ( $|\theta_{km}| < 15^\circ \text{el}$ ) u realnim pogonskim uslovima.

Dakle, prethodno rečeno govori o dominantnoj ulozi elemenata  $b_{kk}$ ,  $b_{mm}$ ,  $b_{km}$  i  $b_{mk}$ , što su i analize u nizu konkretnih primera potvrdile. To je omogućilo opravdano zanemarenje ostalih članova u relacijama (23) - (26).

Dalje, u slučaju elemenata submatrica koeficijenata, koji su dati preko relacija (27)–(31), uvođenjem sledeće opravdane pretpostavke :

$$\cos(\theta_{km} + \phi) \approx 1 \quad (32)$$

dolazi se do njihovih konstantnih vrednosti.

Na kraju, koristeći ideju izloženu u [24] (u submatrici koeficijenata koja se odnosi na aktivne snage zanemaruju se rezistanse, a u submatrici koja se odnosi na reaktivnu snagu, dupliraju se šantovi), sistemi jednačina (19) i (29) svode se na sledeća dva sistema raspregnutih jednačina:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^c/V \\ \Delta P_c/V \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} B' & B'_{p\phi} \\ B'_{p\theta} & B'_\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\Theta \\ \Delta\phi \end{bmatrix}^{k+1} \quad (33)$$

$$\Delta Q^c/V = B'' \Delta V^{l+1} \quad (34)$$

Na taj način, do traženih vrednosti uglova regulacije SPST, koji obezbeđuju zadate tokove aktivnih snaga na odabranim elementima (dalekovodima), dolazi se sukcesivnim iterativnim rešavanjem (smisao uvedenih subiteracionih indeksa  $k$  i  $l$ ) dva raspregnuta (naravno, samo tokom pojedine iteracije) sistema jednačina, u kojima elementi svih prisutnih submatrica koeficijenata  $B'$ ,  $B'_{p\phi}$ ,  $B'_{p\theta}$ ,  $B'_\phi$  i  $B''$  imaju konstantne vrednosti, za nepromenjenu topologiju.

Pri tome, potrebno je posebno da se naglasi da kvadratne submatrice  $B'$  i  $B''$ , dimenzija  $(N-1)$  i  $NL$ , respektivno, su identične odgovarajućim submatricama u poznatoj brznoj dekoplovanju metodi [24].

Dalje, submatrica  $B'_{p\theta} = B'_{p\phi}{}^T$  ( $T$  – oznaka za transpoziciju), a submatrica  $B'_\phi$  ima samo dijagonalne elemente. Dakle, matrica koeficijenata raspregnutog sistema jednačina (33) je simetrična. Submatrice  $B'_{p\theta}$ ,  $B'_{p\phi}$  i  $B'_\phi$ , dimenzija  $(NCL) \times (N-1)$ ,  $(N-1) \times (NCL)$  i  $(NCL) \times (NCL)$ , respektivno, imaće sledeće elemente:

$$\begin{aligned}
b'_{p\phi ki} &= \frac{1}{X_{km}}; & b'_{p\phi mi} &= -\frac{1}{X_{km}}; \\
b'_{p\Theta ki} &= \frac{1}{X_{km}}; & b'_{p\Theta mi} &= -\frac{1}{X_{km}}; \\
b'_{\phi ki} &= \frac{1}{X_{km}}; & &
\end{aligned} \tag{35}$$

$i \in \text{NCL}, k, m \in \text{NC}$

Očigledno, razvijena metoda upravljanja tokovima aktivnih snaga je znatno jednostavnija od prilaza baziranog na metodi Newtona, koji je izložen u radu [12]. Ta jednostavnost, saglasno raspregnutim jednačinama (33) i (34), neposredno proizilazi iz činjenice da se za datu topologiju EES-a i niz mogućih lokacija ovih kontrolera i niz njihovih mogućih podešenja, simetrične submatrice koeficijenata  $B'$ ,  $B'_{p\phi}$ ,  $B'_{p\Theta}$ ,  $B'_{\phi}$  i  $B''$  formiraju samo jedanput (kao što se i njihova dvojnja trouglasta faktorizacija takođe vrši samo jedanput). Dakle, tokom dalje iterativne procedure vrši se samo određivanje novih vrednosti vektora debalansa ("mismatche"), saglasno datim relacijama (9)–(13).

Uz ovu jednostavnost i evidentno male memorijske zahteve, razvijena metoda ima opšti karakter i poseduje veliku numeričku efikasnost, o čemu će, uz ostale relevantne praktične aspekte, biti reči u narednim poglavljima.

### 3.5. Posebni slučajevi razvijene metode upravljanja tokovima snaga

Posebni slučaj prethodno date opšte formulacije upravljanja tokovima snaga je slučaj kada je  $\text{NCL} = 0$  i  $\text{NCU} \neq 0$ , odnosno, slučaj kada prisutnih  $\text{NCU}$  kontrolera nisu u tzv "aktivnoj funkciji". Tokom proračuna tokova snaga ovi kontroleri ne menjaju unapred podešenu vrednost ugla regulacije  $\phi$ , odnosno samo se određuju njihovi neposredni efekti na tokove snaga.

U ovom slučaju, kada je  $\text{NCL} = 0$  i  $\text{NCU} \neq 0$ , nema više submatrica  $B'_{p\phi}$ ,  $B'_{p\Theta}$ ,  $B'_{\phi}$ , jer uglovi regulacije nisu više varijable, tako da se tokovi snaga određuju iterativnim rešavanjem sledećih sistema raspregnutih jednačina:

$$\Delta P^C / V^k = B' \Delta \theta^{k+1} \tag{36}$$

$$\Delta Q^C / V^k = B'' \Delta \theta^{k+1} \tag{37}$$

Kako je to već rečeno, kvadratne submatrice  $B'$  i  $B''$  sa konstantnim elementima, dimenzija  $(N-1)$  i  $NL$ , respektivno, su identične odgovarajućim submatricama u poznatoj brznoj dekuplovanoj metodi [24]. Dakle, tokom dalje iterativne procedure vrši se samo određivanje novih vrednosti vektora debalansa  $\Delta P^C$  i  $\Delta Q^C$ , saglasno datim relacijama (10)–(13) (relacije (9) tada nisu u funkciji).

Na kraju, u slučaju da u razmatranoj interkonekciji ne postoje kontroleri ( $\text{NCU} = 0$ ), sistemi jednačina se transformišu u poznati brzi raspregnuti postupak [24].

$$\Delta P / V^k = B' \Delta \theta^{k+1} \tag{38}$$

$$\Delta Q / V^k = B'' \Delta V^{k+1} \tag{39}$$

jer su tada u pitanju samo tzv. konvencionalni tokovi snaga.

#### 4. RAČUNARSKI PROGRAM *UTOKOVI*

Na bazi izloženog matematičkog modela i tehnike njegovog rešavanja, u Institutu "Nikola Tesla" od strane autora ovoga rada razvijen je računarski program **UTOKOVI** (Upravljanje **TOKOVI**ma), koji pored glavnog programa ima 16 potprograma tipa subroutine.

U realizaciji ovog računarskog programa primenjen je Compaq Fortran Compiler-verzija 6. x., a omogućeno je tretiranje interkonekcija sa 10000 čvorova, 30000 grana, 2000 generatora, 4000 transformatora, 200 regulacionih basena i 100 statičkih transformatora za regulaciju ugla, odnosno kontrolera tokova snaga.

Osnovne mogućnosti, odnosno funkcije ovoga računarskog programa su sledeće:

- A. Određivanje tokova snaga u slučaju kada je  $NCL = NCU = 0$ , odnosno kada u razmatranoj interkonekciji nema instaliranih kontrolera;
- B. Određivanje tokova snaga u slučaju kada postoje kontroleri ( $NCU \neq 0$ ), ali među njima nema tzv. "aktivnih kontrolera" ( $NCL = 0$ ). Tada se samo utvrđuju efekti tzv. "pasivnih kontrolera", koji imaju unapred zadatu fiksnu vrednost ugla regulacije;
- C. Određivanje tokova snaga u slučaju kada je  $NCL < NCU$ , odnosno kada od prisutnih  $NCU$  kontrolera, njih  $NC$  automatski podešavaju svoj ugao regulacije, za zadati tok snage na elementu na kome je instaliran.
- D. Određivanje tokova snaga u slučaju kada je  $NCL = NCU$ , odnosno kada svih prisutnih  $NCU$  kontrolera automatski podešavaju svoje uglove regulacije, za zadate tokove aktivnih snage na elementima na kojima su instalirani.

Opcija A odgovara proračunu tzv. konvencionalnih tokova snaga, koji se, kako je to prethodno objašnjeno, obavlja preko poznate metode Stott- Alsaca [24]. Ostale opcije u primeni ovoga računarskog programa B, C i D obuhvataju postojanje kontrolera.

Za opciju B, to su samo tzv. "pasivni" kontroleri, a za opciju C, u pitanju je kombinacija tzv. "pasivnih" i "aktivnih" kontrolera. Na kraju, u okviru opcije D operiše se samo sa tzv. "aktivnim" kontrolerima, odnosno na svim dalekovodima na kojima su instalirani vrši se upravljanje tokovima aktivnih snaga, automatskim određivanjem podešenja odgovarajućih uglova regulacije. Za opcije C i D, ukoliko tokom proračuna uglovi regulacije kontrolera prevazilaze raspoloživi opseg, program se zaustavlja i upozorava korisnika da problem upravljanja nije adekvatno formulisan.

#### 5. PRIMERI PRAKTIČNE PRIMENE RAZVIJENOG PROGRAMA *UTOKOVI*

Prva praktična iskustva u primeni razvijene metode (odnosno pomenutog računarskog programa *UTOKOVI*) za upravljanje tokovima aktivnih snaga stečena su na primeru realne elektroenergetske interkonekcije, koju sačinjavaju EES Srbije i Crne Gore (SCG), Rumunije (RO), Bugarske (BG), Makedonije (MK), Grčke (GR) i Albanije (AL) (odnosno reč je o Drugoj UCTE sinhronoj zoni).

Na slici 1 daje se blok dijagram razmatrane interkonekcije. Modelovane su kompletne mreže 400 i 220 kV u svim prikazanim EES, osim u EES Grčke, gde su kompletno modelovane mreže 400 i 150 kV samo u njegovom severnom delu (a ostatak je predstavljen preko ekvivalenta Wardovog tipa, dobijenog od grčke elektroprivrede).

Na istoj slici daju se tokovi aktivnih i reaktivnih snaga po interkonektivnim dalekovodima (MW/Mvar), za slučaj kada nema programiranih totala razmena između

posmatranih EES-a ( tzv.“nulti” programi razmene). Dakle, tokovi snaga prikazani na pomenutoj slici su zapravo tzv. "slobodni tokovi" snaga ("ring" ili "parallel" flows).

Pre navođenja konkretnih praktičnih primera, trebalo bi posebno napomenuti da su oni tako izabrani da u prvom redu dovedu do velikih iskušenja razvijenu metodu u pogledu karakteristika konvergencije.

Prvi primer praktične primene razvijene metode odnosio se na scenario utvrđivanja mogućnosti eliminacije (*naravno, u pitanju je bio hipotetički scenario, ali veoma indikativan u pogledu testiranja mogućnosti razvijene metode*) registrovanih slobodnih tokova snaga na relaciji  $AL \rightarrow SCG \rightarrow GR$ . Praktično je bilo reč o utvrđivanju mogućnosti za eliminaciju fizičkih tokova snaga po interkonektivnim vodovima na pomenutoj relaciji.

Za tako postavljeni cilj, SPST su bili instalirani na početku interkonektivnih dalekovoda 220 kV Fierza (AL) - Prizren (SCG) i 400 kV Elbasan (AL) - Kardina (GR), sa unapred zadatim, *nultim tokovima aktivnih snaga*. Za pomenuti scenario, Tabela 1 daje kretanje maksimalnog odstupanja snaga ("the maximum power mismatches") tokom iterativne procedure rešavanja sistema jednačina (33) i (34), kao i korekcija ugla regulacije SPST, instaliranih na početku prethodno pomenutih interkonektivnih dalekovoda..

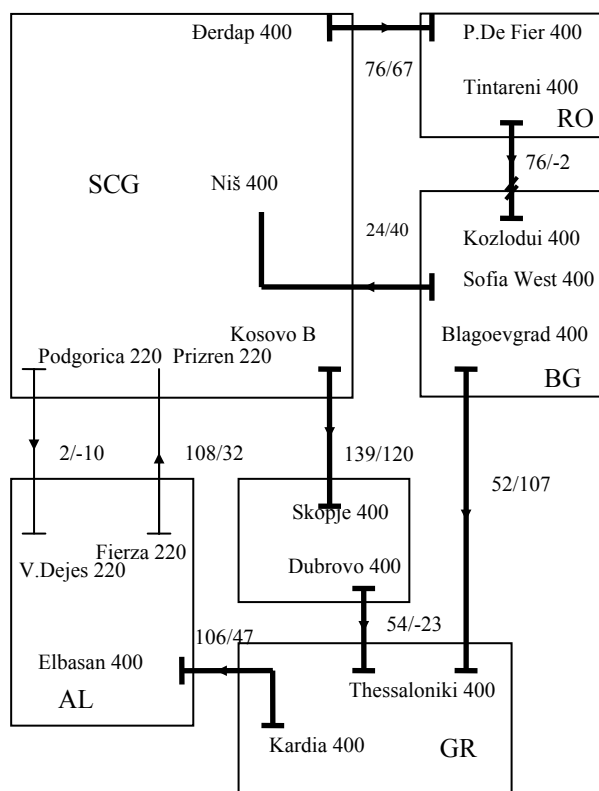
Potrebno je napomenuti da je u ovom i u svim narednim slučajevima, početak iterativne procedure imao tzv. "flat"("miran") start (nominalne vrednosti napona u svim "PQ" čvorovima i nulta vrednost za sve uglove, uključujući i ugao regulacije SPST).

Kao rezultat, nakon samo pet iteracija došlo se do automatskih podešenja SPST (- 8.792 i 8.981 °el), koja (podešenja) bi obezbedila da *specificirani fizički tokovi aktivnih snaga na pomenutim interkonektivnim dalekovodima imaju nultu vrednost*.

Ostali primeri praktične primene razvijene metode koji se navode u daljem tekstu ovoga rada, nisu više u domenu čiste hipotetike, kao prethodni slučaj, već se bave scenarijima koji nisu sasvim van realnosti, a uvršćeni su prvenstveno u cilju da se razvijena metoda dovede u maksimalna, pre svega, numerička iskušenja.

*Tabela 1. Maksimalne vrednosti debalansa snaga i vrednosti korekcija ugla regulacije SPST tokom iterativne procedure eliminacije "slobodnih tokova" snaga na relaciji  $AL \rightarrow SCG \rightarrow GR$*

Broj iteracije	max $ \Delta P $ (MW)	max $ \Delta Q $ (Mvar)	max $ \Delta Pc $ (MW)	$\Delta\phi 1$ (°el)	$\Delta\phi 2$ (°el)
0	1727.4	4901.7	0.0000	-4.453	13.586
1	198.8	262.6	8.891	-4.124	-4.643
2	22.1	14.1	1.904	-0.199	0.042
3	1.7	0.609	0.126	-0.013	-0.007
4	0.116	0.047	0.010	-0.001	0.000
5	0.010	0.031	0.001	-	-



*Slika 1. Tokovi aktivnih i reaktivnih snaga po interkonektivnim dalekovodovima za tzv. "nulti" program razmene*

Tako, na primer, u pomenutom kontekstu maksimalnih iskušenja, Tabela 2 odgovara slučaju kada EES Grčke izvozi 800 MW EES Srbije i Crne Gore, a SPST su instalirani na početku interkonektivnih dalekovoda 400 kV Dubrovo (MK) - Thessaloniki (GR) ( $\Delta\phi_1$ ) i Thessaloniki GR) - Blagoevgrad (BG) ( $\Delta\phi_2$ ), sa unapred specificiranim aktivnim snagama u iznosu -300 i 300 MW, respektivno. Iz ove tabele se uočava da je bilo potrebno opet samo pet iteracija da se dođe do traženih vrednosti uglova regulacije SPST (-8.921 i 4.691 °el), koji omogućuju da tokovi aktivnih snaga imaju zadate iznose -300 MW, odnosno 300 MW.

*Tabela 2. Maksimalne vrednosti debalansa snaga i korekcije ugla regulacije SPST tokom iterativne procedure (scenario - GR izvozi 800 MW SCG a SPST su instalirani na početku interkonektivnih dalekovoda 400 kV Dubrovo (MK) - Thessaloniki (GR) i Thessaloniki GR) - Blagoevgrad (BG))*

Broj iteracije	max $ \Delta P $ (MW)	max $ \Delta Q $ (Mvar)	max $ \Delta P_c $ (MW)	$\Delta\phi_1$ (°el)	$\Delta\phi_2$ (°el)
0	1727.4	4901.7	300	-9.324	7.062
1	199.6	263.2	11.0	0.055	-2.171
2	22.3	14.2	2.9	0.354	-0.209
3	1.8	0.531	0.122	-0.005	0.009
4	0.114	0.031	0.013	0.0009	0.0013
5	0.006	0.016	0.002	-	-

Tabela 3 odgovara istom programu razmene (GR → SCG 800 MW), ali je došlo do ispada interkonektivnog dalekovoda 400 kV Thessaloniki (GR) - Blagoevgrad (BG).

Pretpostavljeno je da je na interkonektivnom dalekovodu 400 kV Elbasan (AL) - Kardia (GR) instaliran SPST, sa specificiranim tokom aktivne snage u iznosu -250 MW. Ovaj slučaj je u praktičnom smislu veoma interesantan, jer bi se bez ovoga SPST interkonektivni dalekovod 400 kV Elbasan (AL) - Kardia (GR) opteretio sa 482 MW, odnosno jedan jedini autotransformator u Elbasanu (300 MVA, 400/220 kV) bi se znatno preopteretio. Dakle, sa relativno malom vrednošću ugla regulacije SPST (11.255 °el), u poređenju sa mogućnostima postojećih SPST, došlo bi do zadovoljavajućeg postdinamičkog stanja, nakon ispada interkonektivnog dalekovoda 400 kV Thessaloniki (GR) - Blagoevgrad (BG).

*Tabela 3. Maksimalne vrednosti debalansa snaga i vrednosti korekcije ugla regulacije SPST tokom iterativne procedure (GR izvozi 800 MW SCG ; dalekovod Thessaloniki (GR) - Blagoevgrad (BG) je van pogona)*

Broj iteracije	max $ \Delta P $ (MW)	max $ \Delta Q $ (Mvar)	max $ \Delta P_c $ (MW)	$\Delta\phi_1$ (°el)
0	1727.4	4901.7	250	13.261
1	199.5	263.9	11.9	-2.251
2	22.5	14.3	0.508	0.242
3	1.8	0.547	0.004	-0.001
4	0.119	0.016	0.000	0.001
5	0.006	0.031	0.000	-

Na kraju, Tabela 4 daje ukupan broj iteracija potrebnih za dostizanje zahtevane tačnosti od 0.1 MW i 0.1 Mvar, kao i konačno podešenje ugla regulacije SPST, instaliranog na početku interkonektivnih dalekovoda 400 kV Dubrovo (MK) - Thessaloniki (GR) i Thessaloniki (GR) - Blagoevgrad (BG), za realizaciju različitih zadatih tokova snaga.

Na taj način, početna iskustva u praktičnoj primeni razvijene metode, sticana na primeru realne interkonekcije, govore o njenoj jednostavnosti i veoma dobrim

karakteristikama konvergencije. U daljem radu na ovoj značajnoj problematici, zajedno sa primenjenim konvencionalnim modelom tokova snaga operisaće se i sa tzv. nestandardnim modelima tokova snaga. Tu se u prvom redu misli na modele tokova snaga u karakterističnim postdinamičkim kvazistacionarnim stanjima, koji su osnova metodologije (odnosno računarskom programu STATIC [18]) za analize statičke sigurnosti elektroenergetskih interkonekcija.

*Tabela 4. Ukupan broj iteracija za postizanje zadate tačnosti od 0.1 MW i 0.1 Mvar i dobijene vrednosti ugla regulacije  $\phi$  za zadate tokove snaga  $P_C^{sp}$*

Dubrovo(MK)-Thessaloniki (GR)		Thessaloniki(GR)-Blagoevgrad (BG)		Ukupan broj iteracija
$P_C^{sp}$ (MW)	$\phi$ (°el)	$P_C^{sp}$ (MW)	$\phi$ (°el)	
-100	9.662	400	-1.736	5
-200	5.790	300	-6.121	5
-200	-4.863	400	8.841	5
-300	-8.921	300	4.691	5
- 300	-20.178	400	19.113	6
- 400	-13.166	200	0.538	5

## 6. ZAKLJUČCI

U radu su prikazani razvoj i praktična primena jedne metode upravljanja tokovima aktivnih snaga pomoću statičkih transformatora za regulaciju ugla. Za zadate tokove aktivnih snaga na odabranim elementima (dalekovodima), razvijena metoda na veoma jednostavan i efikasan način utvrđuje potrebne vrednosti ugla regulacije ovih serijskih FACTS kontrolera tokova snaga, respektujući postojeća ograničenja.

Karakteristike i mogućnosti razvijenog računarskog programa UTOKOVI, baziranog na izloženoj metodi, utvrđivane su na primeru realne elektroenergetske interkonekcije. Rezultati praktične primene, čiji je samo manji obim izložen u radu, ukazuju na moguće značajne tehničke efekte ovih kontrolera tokova snaga.

Proučavanje njihovih efekta moglo bi biti veoma interesantno i izazovno u budućnosti, kada bude formirano Regionalno tržište električne energije u jugoistočnoj Evropi, a pogotovu kada ono intezivno "proradi".

Takođe, nije sasvim isključeno da će se, u uslovima povezivanja Druge UCTE sinhronne zone sa glavnim delom interkonekcije UCTE i njenim širenjem na Istok i pojavi većih tranzita snaga u dužem vremenskom trajanju, pokazati tehno-ekonomska opravdanost ugradnje ovih kontrolera na najpogodnijim lokacijama. Pri tome će se svakako respektovati već prisutna pozitivna inostrana iskustva u praktičnoj primeni ovih kontrolera.

## LITERATURA

- [1] Erche M. et al., "Improvement of Power Performances Using Power Electronic Equipment", *CIGRE 1992, Session, PARIS*, 30 Aug - 5 Sept, paper 14/37/38-02, 1992
- [2] Povh D. et al., "CIGRE Technical Brochure: Load Flow Control in High Voltage Systems Using FACTS Controllers", *Electra*, No 164, February 1996, pp. 162-165

- [3] "Definitions of Transfer Capacities in Liberalised Electricity Markets", Final Report, *ETSO*, April, 2001
- [4] "Procedures for Cross-Border Transmission Capacity Assessments", *ETSO*, October, 2001
- [5] "Evaluation of congestion management methods for cross-border transmission", *ETSO*, Florence Regulators Meeting, November, 1999
- [6] Mijailović S.V., Vujasinović Z., Apostolović M., "Pregled aktuelnih metoda za upravljanje zagušenjima u prenosnoj mreži u Evropi", *Elektroprivreda*, br. 1, 2004, str.40-55.
- [7] "Analysis of Electricity Network Capacities and Identification of Congestion", *IAEW and CONSENTEC*, Final Report, Aachen, December 2001
- [8] Stott B. and Hobson E., "Power System Security Control Calculations Using Linear Programming, Part I", *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-97, No. 5, September/October 1978, pp.1713-1720
- [9] Han. Z.X., "Phase Shifter and Power Flow Control", *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-101, October 1982, pp. 3790-3795.
- [10] Mescua J., "A Decoupled Method for Systematic Adjustment of Phase - Shifting and Tap - Changing Transformers", *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-104, September 1985, pp.2315-2321.
- [11] Sprinivasan N. et al., "On-line Computation of Phase Shifter Distribution Factor and Lineload Alleviation", *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-104, No 7, July 1985, pp.1656-1662.
- [12] Noroozian M. and Andersson G., "Power Flow Control by use of Controllable Series Components", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 8, No. 3, July 1993, pp. 1420-1429.
- [13] Cr.Fuerte – Esquivel and Acha E., "A Newton - Type Algorithm for the Control of Power Flow in Electrical Power Networks", *IEEE Trans. on PAS*, Vol.12, No. 4, November 1997, pp. 1474-1480.
- [14] Popović D.P., "Generalizovani model transformatora i tokovi snaga", *Elektroprivreda*, br. 1, 2003, str. 3-14.
- [15] *Memorandum of Understanding for the Establishment of a Competitive Regional Electricity Market (REM) in South Eastern Europe*, Athens, 2000
- [16] *Study on the Development of a Competitive Balkan Electricity Market*, 1999
- [17] Popović D. P., "Jedna metoda proračuna tokova snaga u elektroenergetskim sistemima sa serijskim FACTS kontrolerima", *Elektroprivreda*, br. 1, 1998, str. 11-22.
- [18] Popović D. P., "An Efficient Methodology for Steady-State Security Assessment of Power Systems", *Int. Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 10, No. 2, April 1988, pp. 110-116.
- [19] Popović D.P., Mijailović S., Papazoglou T., "Moguća poboljšanja performansi rada elektroenergetskih interkonekcija primenom nekih od elemenata FACTS tehnologije", *Elektroprivreda*, br. 1, 1995., str. 16-22.



- [20] Papazoglou T. Popović D.P., Mijailović S., "Analysis of the Effects of Application of PST and CSC on the Performance of the UCPTTE System in the Balkans", *Stockholm Power Tech Conference*, Stockholm, June 18-22., 1995., paper SPT PS 16-02-0520, pp. 490-493.
- [21] Dechamps C., Nuytten R., Vankelecom J., *Constrained Low Flow - Optimum Power Flow, CLF-OPF: User guide*, Systems-Europe S.A. Publication Bruxelles, 1997.
- [22] Tinney W.F. and Hart C.E., "Power Flow Solution by Newton's Method", *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-86, No.11, November 1967, pp. 1449-1467.
- [23] Popović D.P., "Metode određivanja tokova snaga u EES sa serijskim FACTS kontrolerima, u uslovima karakterističnih dinamičkih procesa", *Elektroprivreda*, br.3, 1998, str.7-13
- [24] Stott B. and Alsac O., "Fast Decoupled Load Flow", *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-93, no.3, May/June 1974, pp. 856-869.

**Abstract:** This paper presents an efficient fast decoupled power flow control method, e.g. method for automatic adjustment of a static phase shifting transformers (SPST) for specified line flows. The effects of a SPST are represented by injection model and the corresponding extension of conventional load flow equations is made. Furthermore, the load flow control by means of PST is modeled by corresponding additional equations. For solution of the power flow control problem defined, the special fast decoupled procedure is developed. The high numerical efficiency and simplicity of this procedure has been established on the example of real interconnection formed by the power system of Serbia and Montenegro, Romania, Bulgaria, Macedonia, Greece and Albania (Second UCTE synchronous zone)

**Keywords:** *phase shifting transformer, FACTS, power flow control, method, Second UCTE synchronous zone*

### **ACTIVE POWER FLOW CONTROL BY USE OF STATIC PHASE SHIFTING TRANSFORMERS**

Dragan P. Popović