

## INICIJALIZACIJA ANALIZA STATIČKE SIGURNOSTI ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA

Dragan P. Popović,  
*Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd*

**Sadržaj:** U radu se izlažu dva efikasna postupka određivanja tokova snaga u polaznim ustaljenim stanjima, koja prethode analizama statičke sigurnosti elektroenergetskih sistema. Ovi postupci su u potpunosti konzistentni sa postupkom određivanja tokova snaga u nizu karakterističnih postdinamičkih kvazistacionarnih stanja, nastalih nakon razmatranih poremećaja. Takva osobina razvijenih postupaka omogućuje punu autonomnost i uniformnost analiza sigurnosti, kao i njihovo sukcesivno odvijanje. Efikasnost predloženih postupaka utvrđena je na primeru postojeće elektroenergetske interkonekcije na prostorima Balkana.

**Ključne reči:** tokovi snaga/polazno ustaljeno stanje/statička sigurnost/Balkanska interkonekcija

### 1 UVOD

Opšte poznate činjenice o aktuelnosti i značaju analiza sigurnosti savremenih elektroenergetskih sistema (EES) znatno olakšavaju autorima radova iz ove problematike pisanje uvodnog dela, omogućujući im da se neposredno koncentrišu na osnovni cilj i sadržaj rada.

Ovaj rad bavi se analizama statičke sigurnosti EES-a, koje i dalje imaju jedno od najznačajnijih mesta u okviru sistema za nadzor i upravljanje EES-a [1]. U pomenutom kontekstu, predmet posebne pažnje je inicijalizacija analiza sigurnosti, odnosno određivanje tokova snaga u razmatranim ustaljenim stanjima EES.

Prilazi analizama statičke sigurnosti vodećih svetskih proizvođača sistema za nadzor i upravljanje EES-a (Siemens, Harris i Landis and Gyr) [2, 3, 4, 5], bazirani su na konvencionalnom (ili klasičnom) modelu tokova snaga, u kome su jedine varijable nepoznati uglovi i moduli fazora napona. Tada, referentni čvor (čije uvođenje je neophodno radi eliminacije singulariteta) istovremeno ima funkciju balansnog čvora. Tako formirani model, rešavan je veoma efikasno, primenom dobro poznatog brzog raspregnutog postupka Stott-Alsaca [6], koji je služio i za određivanje tokova snaga u razmatranim polaznim ustaljenim stanjima.

U metodologiji za studijske analize statičke sigurnosti EES-a razvijenoj u studiji [7], osnovu čini tzv. nekonvencionalni model tokova snaga, u kome su uvedene nove varijable: kvazistacionarna vrednost jedinstvene učestanosti razmatrane interkonekcije i vrednosti debalansa u njenim regulacionim basenima. Pri tome, i dalje je bilo neophodno uvođenje referentnog čvora, iz istih razloga (eliminacija singulariteta), s tim da se njegov izbor vrši proizvoljno (bilo koji čvor u razmatranoj interkonekciji). U takvom prilazu, svi čvorovi imaju ulogu balansnog, odnosno konačne vrednosti snaga (aktivnih i reaktivnih) su funkcija i uspostavljene kvazistacionarne vrednosti učestanosti u razmatranim karakterističnim postdinamičkim stanjima. Za rešavanje tako formiranog

modela, razvijen je postupak, koji, po analogiji sa postupkom Stott-Alsaca, takođe vrši razdvajanje varijabli tokom pojedine iteracije [8, 9].

Uvođenjem učestanosti kao varijable, omogućena je dovoljno tačna i konsekventna kvantifikacija posledica tretiranih poremećaja (posebno poremećaja tipa gubitaka većih injektiranja), kroz određivanje tokova snaga u karakterističnim postdinamičkim kvazistacionarnim stanjima. Dakle, umesto veštačkog uvođenja participacionih faktora, u metodologiji razvijenoj u studiji [7], striktno se uvažava "fizika" procesa, kroz respektovanje stvarnih regulacionih karakteristika i mogućnosti agregata i sistema automatske sekundarne regulacije učestanosti i snaga razmene.

U takvim uslovima, inicijalizacija analiza sigurnosti, odnosno određivanje tokova snaga u polaznim ustaljenim stanjima obavljalo se poznatim računarskim programom CLF-OPF, kao i računarskim programom DLF-OPF, a koji su bazirani na klasičnom modelu tokova snaga. Naravno, takvo rešenje nije dovelo u pitanje efikasnost kompletnih analiza sigurnosti, o čemu svedoče relevantni pokazatelji, izneti u [7, 10, 11].

Međutim, ako bi se striktno respektovao imperativ autonomnosti analiza sigurnosti, odnosno zahtev za jedinstvenom programskom celinom, to bi praktično značilo da se tokovi snaga u polaznim ustaljenim stanjima i karakterističnim postdinamičkim kvazistacionarnim stanjima određuju na jedinstveni način, a to je upravo i cilj ovoga rada.

U njemu je pokazano kako se razvijeni nekonvencionalni modeli tokova snaga i tehnike njihovog rešavanja mogu veoma efikasno da se upotrebe i za određivanje tokova snaga u razmatranim polaznim ustaljenim stanjima. Time se, kako će to biti pokazano na primeru postojeće interkonekcije na prostorima Balkana, postiže željena autonomnost i unifikacija analiza sigurnosti i njihovo sukcesivno odvijanje.

## 2 REGISTAR UPOTREBLJENIH OZNAKA

|                          |  |
|--------------------------|--|
| N -                      | Ukupan broj, odnosno oznaka skupa svih čvorova EES-a   |
| NG -                     | Ukupan broj, odnosno oznaka skupa generatorskih čvorova  |
| NSV -                    | Ukupan broj, odnosno oznaka skupa generatora koji imaju statičku karakteristiku napon – reaktivna snaga                        |
| NL -                     | Ukupan broj, odnosno oznaka skupa svih "neproizvodnih" čvorova (NL=N-NG)   |
| $\Delta f = f - f_0$ -   | Odstupanje kvazistacionarne vrednosti jedinstvene učestanosti EES-a $f$ od svoje vrednosti iz polaznog ustaljenog stanja $f_0$ |
| s -                      | Stalni statizam primarne regulacije učestanosti agregata   |
| $P_{Gn}$ -               | Nominalna aktivna snaga generatora   |
| $k_p$ -                  | Regulaciona konstanta agregata ( $k_p = 100P_{Gn}/s f_n$ )   |
| $P_{GO}, Q_{GO}$ -       | Aktivna i reaktivna snaga generatora u polaznom ustaljenom stanju  |
| $V_{GO}$ -               | Napon na krajevima generatora u polaznom ustaljenom stanju   |
| $s_V$ -                  | Statizam primarne regulacije napona generatora   |
| $P_L(V, f), Q_L(V, f)$ - | Aktivna i reaktivna snaga potrošača kao složene nelinearne funkcije od napona i učestanosti                                    |
| $P_{Loi}, Q_{Loi}$ -     | aktivna i reaktivna snaga potrošača u polaznom ustaljenom stanju za $V_i = V_{oi}$ i $f = f_n$                                 |
| $p_{li}, q_{li}$ -       | deo aktivne, odnosno reaktivne snage potrošača koji ima konstantnu vrednost  |

|                     |  |
|---------------------|--|
| $p_{2i}, q_{2i}$ -  | deo ukupne aktivne, odnosno reaktivne snage potrošača proporcionalan $N_{1i}$ -tom, odnosno $N_{2i}$ -tom stepenu napona na njegovim krajevima |
| $p_{3i}, q_{3i}$ -  | deo ukupne aktivne, odnosno reaktivne snage potrošača koji ima karakter konstantne impedanse   |
| $k_{la}, k_{lr}$ -  | koeficijenti samoregulacije po učestanosti aktivnih, odnosno reaktivnih snaga potrošača  |
| $P, Q$ -            | Aktivna i reaktivna snaga injektiranja   |
| $NSR$ -             | Ukupan broj, odnosno oznaka skupa generatora koji učestvuju u sekundarnoj regulaciji učestanosti i snaga razmene                               |
| $M$ -               | Broj, odnosno oznaka skupa regulacionih basena u zajedničkom sinhronom paralelnom radu   |
| $k_{st}^i$ -        | Koeficijent participacije i-tog generatora u sekundarnoj regulaciji učestanosti i snaga razmene j-tog regulacionog basena                      |
| $P_{Rj}, P_{RPj}$ - | Stvarni i programirani total razmene snaga j-tog regulacionog basena   |
| $B_j$ -             | Sekundarna regulaciona energija j-tog basena   |
| $DEB_j$ -           | Debalans aktivne snage j-tog basena  |
| $RGS_j$ -           | Regulaciona greška j-tog basena  |
| $V, \theta$ -       | Moduo i ugao fazora napona   |
| $B_{ij}$ -          | Konduktansa elemenata i-j  |
| $k, l$ -            | Subiteracioni indeksi  |

### 3 NEKONVENCIONALNI MODELI TOKOVA SNAGA

#### 3.1. Jednačine balansa u karakterističnim postdinamičkim kvazistacionarnim stanjima

U postdinamičkim kvazistacionarnim stanjima razmatrane interkonekcije, uspostavljenim nakon poremećaja i dejstva primarne regulacije napona i učestanosti, važe sledeće jednačine balansa [8, 9]:

$$\Delta P_i = P_{GOi} - k_{pi} \Delta f - P_i = 0, \quad i \in NG \quad (1)$$

$$\Delta Q_i = Q_{GOi} + Q_{GOi} \frac{V_{GOi} - V_{Gi}}{s_{Vi} V_{GOi}} - Q_i = 0, \quad i \in NSV \quad (2)$$

$$\Delta P_i = P_{Li}(V_i, f) - P_i = 0, \quad i \in NL \quad (3)$$

$$\Delta Q_i = Q_{Li}(V_i, f) - Q_i = 0, \quad i \in NL \quad (4)$$

Od niza mogućih prilaza modelovanju potrošača, odabran je prilaz, izložen u [12], obzirom na njegovu fleksibilnost i mogućnost uvažavanja različitih vrsta uticaja napona i učestanosti. Uticaj učestanosti i napona na snage potrošača, dat je preko sledećih relacija

$$P_{Li}(V_i, f) = P_{LOi} (1 + k'_{lai} \Delta f) [p_{1i} + p_{2i} (V_i / V_{oi})^{N_{1i}} + p_{3i} (V_i / V_{oi})^2] \quad (5)$$

$$Q_{Li}(V_i, f) = Q_{LOi} (1 + k'_{lri} \Delta f) [q_{1i} + q_{2i} (V_i / V_{oi})^{N_{2i}} + q_{3i} (V_i / V_{oi})^2] \quad (6)$$

uz napomenu, da su parametri  $k'_{lai}$  i  $k'_{lri}$ , koji se odnose na samoregulaciju po učestanosti, dati u r.j./Hz. Dakle, izborom koeficijenata  $k'_{lai}$  i  $k'_{lri}$  i koeficijenata tipa p i q, kao i eksponenata  $N_1$  i  $N_2$ , moguće je da se formiraju nizovi različitih karakteristika potrošača.

U uspostavljenim kvazistacionarnim stanjima moraju biti zadovoljena sledeća, tzv. "tvrda" ograničenja

$$P_{G \min i} \leq P_{Gi} \leq P_{G \max i}, \quad i \in NG \quad (7)$$

$$Q_{G \min i} \leq Q_{Gi} \leq Q_{G \max i}, \quad i \in NG \quad (8)$$

Za postdinamička kvazistacionarna stanja nastala nakon dejstva sistema automatske sekundarne regulacije učestanosti i snaga razmene, i dalje su aktuelne jednačine balansa oblika (1), ali samo za generatore koji nisu uključeni u sekundarnu regulaciju, kao i jednačine (2), (3) i (4). Efekti ove regulacije obuhvataju se preko sledećih jednačina

$$\Delta P_i = P_{GOi} - k_{pi} \Delta f + k_{si}^j DEB_j - P_i = 0, \quad i \in NSR \quad (9)$$

$$RGS_j = P_{Rj} - P_{RPj} + B_j \Delta f = 0, \quad j \in M \quad (10)$$

Potrebno je napomenuti, da za agregate koji učestvuju u sekundarnoj regulaciji, uslov dat preko (7) može biti diktiran i ekonomskim razlozima.

Prethodno date jednačine (1-4), naravno, uz dalje uvažavanje ograničenja (7) i (8), aktuelne su i za slučajeve, kada su nakon dejstva sekundarne regulacije bile neophodne odgovarajuće dispečerske akcije (tzv. korektivno upravljanje), radi daljeg saniranja posledica analiziranog poremećaja (na primer, "podizanje" snage na agregatima koji imaju i dalje rotacionu rezervu, aktiviranje brzo startujućih agregata, redukcija potrošnje i dr.).

### 3.2. Tretman ograničenja po aktivnoj i reaktivnoj snazi generatora

U većini postojećih prilaza analizi postdinamičkih stanja, za veličine u nejednakosti (7)  $P_{G \min}$  i  $P_{G \max}$  uzimaju se unapred zadate, konstantne vrednosti, kao i u slučaju konvencionalnih prilaza određivanja tokova snaga.

Međutim, strogo posmatrano, kada je reč o postdinamičkim kvazistacionarnim stanjima sa značajnim odstupanjima učestanosti od njene nominalne vrednosti, trebalo bi da se uvaži tzv. prirodna momentno-brzinska karakteristika turbine [13] (kada više nema dejstva regulatora turbine), a na koju se prelazi pri dostizanju odgovarajućih graničnih vrednosti učestanosti (kod dostizanja donjeg, odnosno gornjeg ograničenja po aktivnoj snazi).

Lako se pokazuje da ove granične vrednosti učestanosti  $f_{gr}$  zavise od početnog i nominalnog opterećenja generatora  $P_{GO}$  i  $P_{Gn}$ , kao i od ekstremnog  $P_{Ge}$  (minimalnog i maksimalnog), a takođe od nagiba momentno-brzinske karakteristike turbine x, odnosno [13]

$$\frac{f_{gr}}{f_n} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{P_{GO}}{xP_{Gn}}\right) + \sqrt{\frac{1}{4} \left(1 - \frac{P_{GO}}{xP_{Gn}}\right)^2 + \frac{P_{Ge}}{xP_{Gn}}} \quad (11)$$

Zamenom u (11), vrednosti  $P_{Gmin}$  i  $P_{Gmax}$ , dobijaju se granične vrednosti učestanosti  $f_{gr}$  i  $f'_{gr}$  koje odgovaraju dostizanju gornjeg ograničenja snage turbine. To znači da u dijapazonu učestanosti  $f'_{gr} < f < f_{gr}$  deluje regulator turbine i njena snaga se menja po linearnoj karakteristici datoj sledećom relacijom:

$$P_G = P_{G0} - k_p \Delta f \quad i \in NG \quad (12)$$

Međutim pri  $f \leq f'_{gr}$  i  $f \geq f_{gr}$ , snaga turbine nema konstantnu vrednost, već se menja u skladu sa prirodno momentno-brzinskom karakteristikom, koje po dostizanju  $f_{gr}$ , odnosno  $f'_{gr}$  imaju oblik

$$P_G = P_{Gmin} f_r - P_{Gn} f_r \frac{\Delta f}{f_n} \quad (13a)$$

odnosno

$$P_G = P_{Gmax} f_r - P_{Gn} f_r \frac{\Delta f}{f_n} \quad (13b)$$

Dakle, za postdinamička kvazistacionarna stanja u kojima dolazi do značajne promene učestanosti, moguće je da za pojedine generatore, umesto jednačine (1) i ograničenja (7), budu aktuelne jednačine oblika (13), što sa aspekta algoritmovanja, kao i same tehnike rešavanja, nije unosile nikakve posebne teškoće.

Problem preciznijeg određivanja ograničenja po reaktivnoj snazi generatora predstavlja nešto složeniji, ali takođe lako rešiv problem.

U prisutnim i raspoloživim modelima tokova snaga u postdinamičkim stanjima [12-18], analogno konvencionalnim modelima, generatorima se najčešće specificira napon na krajevima, koji se održava regulacijom pobude, a reaktivna snaga je nepoznata veličina, odnosno pretpostavka o konstantnom naponu važi sve dok je ispunjen dati uslov (8), pri čemu su  $Q_{Gmin}$  i  $Q_{Gmax}$  unapred zadate, konstantne veličine.

Međutim, kako je maksimalno dozvoljena struja rotora stvarno fizičko ograničenje (tzv. "tvrdo" ograničenje), njoj korespondira niz vrednosti  $Q_{Gmax}^r$

(uveden gornji indeks "r"), odnosno [13]

$$Q_{Gmax}^r = \frac{\sqrt{(E_{Qm} V)^2 - (P_G f_r x_q)^2} - V^2}{f_r x_q} \quad (14)$$

gde je  $E_{Qm}$  maksimalno dozvoljena vrednost elektromotorne sile "iza" sinhronne poprečne reaktanse  $x_q$  koja odgovara maksimalno dozvoljenoj struji rotora.

U slučaju generatora sa cilindričnim rotorom (turbogeneratori), vrednost ove elektromotorne sile iznosi

$$E_{Q_m} = E_{q_m} = E_{q_{mo}} f_r^p \quad (15)$$

a u slučaju mašine sa istaknutim polovima (hidrogeneratori)

$$E_{Q_m} = E_{q_{mo}} f_r^p \frac{x_q}{x_d} + V \frac{x_d - x_q}{x_d} \cos \delta_G \quad (16)$$

gde je  $E_{q_{mo}}$  elektromotorne sila koja odgovara maksimalno dozvoljenoj struji rotora pri nominalnoj učestanosti,  $p$  je faktor koji zavisi od tipa pobudnog sistema (npr.  $p=1$  ako pobudna struja ne zavisi od brzine obrtanja),  $\delta_G$  tzv. "unutrašnji" ugao generatora a  $x_d$  je poduzna sinhrona reaktansa.

Elektromotorna sila  $E_{q_{mo}}$  određuje se preko izraza [13]

$$E_{q_{mo}} = m \frac{I_{fn}}{I_{fo}} V_n \quad (17)$$

gde je  $I_{fo}$  pobudna struja koja u praznom hodu pri nominalnoj brzini obrtanja obezbeđuje nominalni napon na krajevima  $V_n$ , a  $I_{fn}$ , tu istu vrednost napona, pri nominalnom opterećenju. Preko faktora  $m$  označena je mogućnost preopterećenja pobudnog namotaja, koja je zavisna od vremena trajanja preopterećenja i prema [13], vrednost ovog faktora kreće se od 1.05 do 2, za vreme trajanja od 3600 s do 20 s.

Dakle, pomoću izraza (17) određuju se veličine  $E_{q_{mo}}$ , a posredstvom izraza (15) i (16) veličina  $E_{Q_m}$ , da bi na kraju preko izraza (14) bila određena tražena maksimalno dozvoljena reaktivna snaga koja odgovara maksimalno dozvoljenoj struji rotora.

Tzv. "meko" ograničenje je reaktivna snaga generatora koja odgovara maksimalno dozvoljenoj struji statora (uveden gornji indeks "s"), koja se određuje na sledeći način [13]

$$Q_{G_{max}}^s = \sqrt{\left(n \frac{P_{Gn}}{\cos \varphi_n} \frac{V}{V_n}\right)^2 - P_G^2} \quad (18)$$

gde je  $n$  označen dozvoljeni faktor preopterećenja po struji statora ( $n>1$ ),  $P_G$  i  $V$  označavaju tekuće vrednosti a  $P_{Gn}$  i  $V_n$  nominalne vrednosti aktivne snage i napona na krajevima generatora.

Što se tiče donjeg ograničenja  $Q_{G_{min}}$ , čije dostizanje je po pravilu aktuelno u minimalnim stanjima, u kojima mogu da postoje značajne potrebe za potpobuđenim režimima rada pojedinih generatora, njega nije moguće predstaviti na analogan, analitički način. Osnovni razlog leži u činjenici da ovu granicu u savremenim EES najčešće određuje dozvoljeno zagrevanje čeonu zone generatora, a koje ne može dovoljno tačno da se analitički izrazi. Takođe, to je praktično slučaj i kada granica stabilnosti može biti dominantno ograničenje, jer njeno određivanje zahteva složenu simulacionu proceduru, koja prevazilazi okvire ovakvih analiza statičke sigurnosti. Stoga, ograničenja  $Q_{G_{min}}$  treba unapred da se zadaje (npr. granice zagrevanja dobijene eksperimentalnim putem, ili prethodno dovoljno tačno utvrđene granice stabilnosti), preko odgovarajućih tabela, u zavisnosti od aktivne snage  $P_G$  i napona na krajevima (a poželjno i od učestanosti).

#### 4 TEHNIKE REŠAVANJA FORMIRANIH NEKONVENCIONALNIH MODELA TOKOVA SNAGA

Startujući od oblika rešenja koji daje primena metode Newton-Raphsona [19] na jednačine balansa (1-4) uz, podstaknuto radom [6], uvođenje opravdanih pretpostavki i uprošćenja kod formiranja odgovarajućih matrica koeficijenata, razvijen je brzi postupak sa razdvajanjem varijabli tokom pojedine iteracije [8, 9] odnosno postupak koji se svodi na sukcesivno iterativno rešavanje sledeća dva sistema raspregnutih jednačina

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} / V \\ \Delta P_r / V_r \end{bmatrix}^k = [\mathbf{H}' \quad \mathbf{F}'] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta(\Delta f) \end{bmatrix}^{k+1} \quad (19)$$

$$\Delta \mathbf{Q} / V^l = \mathbf{L}' \Delta V^{l+1} \quad (20)$$

Submatrice koeficijenata  $\mathbf{H}'$ ,  $\mathbf{F}'$  i  $\mathbf{L}'$  imaju konstantne vrednosti za nepromenjeno stanje grafa EES-a, odnosno

$$\begin{aligned} H'_{ii} &= V_n B_{ii}, & i \in (N/r) \\ H'_{ij} &= V_n B_{ij}, \quad i \in N; & j \in (N/r) \\ F'_i &= \begin{cases} k_{pi} / V_n, & i \in NG \\ 0, & i \in NL \end{cases} \\ L'_{ij} &= B_{ij}, & i, j \in (NSV \cup NL) \end{aligned} \quad (21)$$

Sa  $V_n$  je označena nominalna vrednost napona, a indeks "r" označava referentni čvor, koji se bira proizvoljno.

U toku rada na studiji [7], razvijena je još jedna opcija tehnike rešavanja, a koja je bazirana na striktnom respektovanju postupka Stott-Alsac-a [6], naravno u delovima koji su zajednički sa prethodno izloženim modelom tokova snaga. To praktično znači, da se kod formiranja submatrice  $\mathbf{H}'$  zanemaruju rezistanse elemenata, uz već zanemarene šantove, a kod formiranja submatrice  $\mathbf{L}'$ , dupliraju se postojeće vrednosti šantova. Takva opcija, sudeći po do sada stečenim iskustvima, dovodi do nešto boljih karakteristika konvergencije razvijenog raspregnutog postupka (broj potrebnih iteracija koji dovodi do rešenja se smanjuje za jednu, a najviše do dve).

Dakle, sukcesivnim (smisao uvedenih indeksa "k" i "l") iterativnim rešavanjem sistema jednačina (19) i (20), uz striktno respektovanje ograničenja (7) i (8), određuju se nepoznate varijable: vektor uglova  $\theta$ , dimenzije N-1, odstupanje kvazistacionarne vrednosti učestanosti od svoje početne vrednosti  $\Delta f$  i vektor modula napona  $V$ , dimenzije NSV+NL. Time se u potpunosti rešava problem određivanja tokova snaga u postdinamičkim kvazistacionarnim stanjima, nastalih nakon poremećaja i dejstva primarne regulacije napona i učestanosti, kao i u takvim stanjima, nakon preduzetih dispečerskih akcija.

Analognim postupkom, dolazi se i do raspregnutih jednačina, koje određuju tokove snaga nakon dejstva sekundarne regulacije učestanosti i snaga razmene. Kako je prikazano u [8], sistem jednačina (9) povećava red za M, jer se uključuju regulacione

greške i debalansi u svim regulacionim basenima. Međutim, i tako jednostavno određivanje tokova snaga bilo je moguće da se i dalje uprosti, odvojenim računanjem regulacionih grešaka, odnosno debalansa (a ne simultano).

Praktično je reč o još jednom raspreganju čija opravdanost proizilazi iz same fizike tretiranog fenomena, odnosno iz činjenice da se automatska sekundarna regulacija učestanosti i snaga razmene (naravno, uz ispunjenje svih uslova za njeno normalno funkcionisanje), obavlja mirno, sporo i, što je najznačajnije, u uslovima srazmerno malih promena relevantnih veličina stanja.

Na taj način i dalje su aktuelni raspregnuti podsistemi (19) i (20), s tim da su u vektoru  $\Delta P/V$  prisutne, u skladu sa (9), koordinate vezane za regulacione elektrane. Sračunavanje vektora debalansa obavlja se posredstvom izraza (10), odnosno tokom iterativne procedure vrše se korekcije vektora  $\Delta P/V$  koje treba da praktično eliminišu nastale regulacione greške.

## **5 POSTUPAK ODREĐIVANJA TOKOVA SNAGA U POLAZNIM USTALJENIM STANJIMA**

U ovom poglavlju biće pokazano kako je moguće da se prethodno izloženi nekonvencionalni modeli tokova snaga (jednačine balansa (1), (2), (3), (4), (9) i (10)) i tehnike njihovog rešavanja (sistemi raspregnutih jednačina (19) i (20)) mogu veoma efikasno da se iskoriste u određivanju tokova snaga u različitim ustaljenim stanjima. Kako će se to videti u narednom izlaganju, sam način njihove upotrebe direktno proizilazi iz suštinskih karakteristika razmatranih polaznih ustaljenih stanja.

### **5.1. Tokovi snaga u uslovima unapred zadatih "voznih redova" izvora**

U ovim uslovima, kao prvo, zadaju se fiksni "vozni redovi" generatora (sem referentnog, odnosno balansnog). Stoga, u jednačinama balansa (1) ne učestvuju članovi  $k_{pi}\Delta f$ , sem za referentni generator. Takođe, svim generatorima unapred se zadaje napon na njihovim krajevima (podržavan regulacijom pobude), tako da ne figurišu jednačine balansa (2). Dalje, odgovarajućim izborom koeficijenata u relacijama (5) i (6), obezbeđuje se konstantna, unapred poznata vrednost aktivnih i reaktivnih snaga potrošača, što je i uobičajeno u analizama polaznih ustaljenih stanja.

Što se tiče "tvrdih" ograničenja po aktivnoj snazi generatora (7), u pitanju su unapred fiksni iznosi, obzirom da je logična pretpostavka da je učestanost EES-a u polaznom ustaljenom stanju jednaka ili bliska nominalnoj vrednosti.

Međutim, kada su u pitanju ograničenja po reaktivnoj snazi generatora (8), u potpunosti važi prethodno data relacija (12), u kojoj relativna vrednost učestanosti  $f_r$  ima fiksnu vrednost (najčešće  $f_r=1$ ).

Na taj način, za polazno ustaljeno stanje EES-a, aktuelne su jednačine balansa (1) (uz izostavljanje člana  $k_{pi}\Delta f$  za sve generatore, sem za referentni), i jednačine (3) i (4) (sa parametrima potrošača, koji diktiraju njihove konstantne, unapred zadate vrednosti). Pri tome, i dalje su aktuelna ograničenja (7) i (8), uz respektovanje prethodno datih objašnjenja.

Dakle, sam način formiranja jednačina balansa (1), (3) i (4) diktira i njihovu tehniku rešavanja, odnosno način formiranja raspregnutih jednačina oblika (19) i (20). Sistem jednačina (19) i dalje je reda  $N$ , (uz napomenu da u submatrici  $F'$  figuriše samo regulaciona konstanta  $k_{pr}$  balansnog generatora), a sistem jednačina (20), redukuje se na red  $NL$ .



U slučaju da se primenjuje prilaz Stott-Alsac-a [6] kod formiranja submatrica  $H'$  i  $L'$ , sistemi jednačina (19) i (20), uz prethodno napomenuto, transformišu se u sledeći oblik

$$\begin{bmatrix} \Delta P / V \\ \Delta P_r / V_r \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \mathbf{B}' & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}'_r & F'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta(\Delta f) \end{bmatrix}^{k+1} \quad (22)$$

$$\Delta Q / V^l = \mathbf{B}'' \Delta V^{l+1} \quad (23)$$

Sasvim je jasno, da je prikazana forma jednačina (22) i (23), kada je reč o određivanju vektora uglova  $\theta$  (dimenzije N-1) i napona  $V$  (dimenzije NL), u potpunosti identična sa formom postupka [6]. A kako će se to pokazati u završnom poglavlju rada, postoji potpuni identitet i u pogledu suštine.

Na taj način, sukcesivnim rešavanjem sistema modifikovanih raspregnutih jednačina (19) i (20), odnosno jednačina (22) i (23), uz striktno respektovanje ograničenja (7) i (8), na prethodno opisani način, određuju se sledeće nepoznate varijable:

- vektor uglova  $\theta$ , dimenzije N-1,
- odstupanje "kvazistacionarne vrednosti učestanosti"  $\Delta f$  od svoje početne vrednosti,
- vektor modula napona potrošačkih čvorova  $V$ , dimenzije NL.

Time je u potpunosti rešen problem određivanja tokova snaga u polazanim ustaljenim stanjima EES, u kojima su unapred zadati fiksni "vozni redovi" generatora i naponi na njihovim krajevima.

U kontekstu ovoga postupka, potrebno je da se da razjašnjenje u pogledu smisla i funkcije varijable  $\Delta f$ , u uslovima određivanja tokova snaga u polaznim ustaljenim stanjima. Kao prvo, sasvim je očigledno da ona, fizički gledano, nije odstupanje kvazistacionarne vrednosti učestanosti EES-a od polazne vrednosti (otuda i prethodni znaci navoda kod njenog pominjanja). Dalje, sasvim je jasno da je ona veštačka varijabla koja je jedino asocirana referentnom (balansnom) čvoru, u kome se fiksira vrednost ugla (obično je to nulta vrednost). Njena vrednost dobijena po završetku iterativne procedure rešavanja modifikovanih jednačina (19) i (20) (odnosno jednačina (22) i (23)) određuje (zajedno sa izabranom vrednošću koeficijenta  $k_{pr}$ ) iznos korekcije ( $-k_{pr}\Delta f$ ) polazne vrednosti snage balansnog generatora  $P_{G0r}$ , koja će u potpunosti "zatvoriti" balans aktivnih snaga u razmatranom polaznom ustaljenom stanju (uključujući i "pokrivanje" gubitaka aktivne snage  $\Delta P_g$ ). Odnosno, po završetku iterativne procedure, važi sledeća jednakost

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq r}}^{NG} P_{G0i} + P_{G0r} - k_{pr} \Delta f = \sum_{i=NG+1}^N P_{Li} + \Delta P_g \quad (24)$$

Kako će to biti pokazano i objašnjeno u završnom poglavlju rada, razvijeni postupak baziran na jednačinama (22) i (23) ima identične konvergentne karakteristike kao postupak [6], nezavisno od izbora referentnog čvora, vrednosti njegove početne snage  $P_{G0r}$  i vrednosti regulacione konstante  $k_{pr}$ .

## **5.2. Tokovi snaga u uslovima postojanja programa razmene između EES-a u zajedničkoj interkonekciji**

Prethodno izneto, odnosilo se na određivanje tokova snaga u polaznim ustaljenim stanjima, uz pretpostavku da su "vozni redovi" izvora unapred zadati, odnosno da se ne razmatraju različiti bilateralni i multilateralni programi razmene između EES-a, koji se nalaze u sinhronom paralelnom radu. U takvim slučajevima, praktično je reč o "supreponiranju" ovih programa razmene na već utvrđeno tzv. bazno stanje razmatrane interkonekcije.

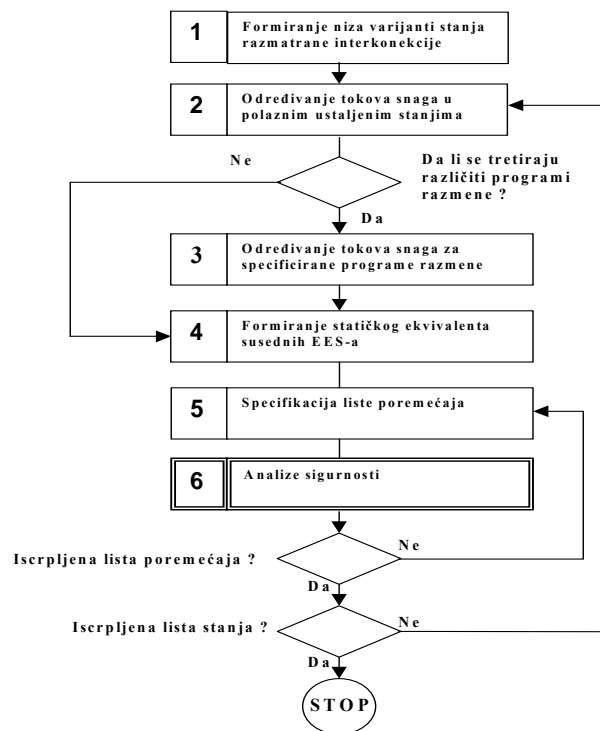
Taj problem je efikasno rešen u radu [20], u kome je data formulacija i praktična primena metodologije, koja, saglasno stvarnoj pogonskoj praksi (u prvom redu, saglasno akciji i efektima automatske primarne regulacije napona i učestanosti i sekundarne regulacije učestanosti i snaga razmene) vrši određivanje tokova snaga za specificirane programe razmena. Time je dobijena dobra osnova za tačniju evaluaciju relevantnih tehničkih efekata kod realizacije značajnih, po iznosu i dužini prenosnih puteva, tranzita snaga.

Pomenuta metodologija bazirana je u potpunosti na nekonvencionalnim modelima tokova snaga (kompletne jednačine (1), (2), (3), (4), (9) i (10)) i njihovoj tehnici rešavanja (jednačine (19) i (20)), izloženim u prethodnim poglavljima ovoga rada.

Primeni ove metodologije prethodi određivanje tokova snaga u polaznom ustaljenom stanju, na način opisan u prethodnom izlaganju. Zatim, specificiraju se programi razmene (bilateralni i/ili multilateralni) između EES-a u interkonekciji (specifikacijom programiranih totala razmene  $P_{RPj}$ ), a koji će se "superponirati" na već utvrđeno tzv. bazno stanje. Za te svrhe, određuju se generatori i korekcije njihovog injektiranja u cilju ostvarenja željenih programa razmene. Dalje, primenom raspregnutih jednačina (19) i (20) određuju se tokovi snaga u uslovima novih "voznih redova" izvora. Zatim, uvođenjem relacija (9) i (10), na način opisan u poglavlju ovoga rada, određuju se tokovi snaga nakon dejstva sistema sekundarne regulacije učestanosti i snaga razmene, čime se garantuje tačna realizacija željenih programa razmene. Time je u potpunosti respektovan redosled operacija koji se obavlja u realnoj pogonskoj praksi.

## **6 GLOBALNI TOK ODVIJANJA ANALIZA STATIČKE SIGURNOSTI**

Na slici 1 prikazan je globalni dijagram toka odvijanja analiza statičke sigurnosti u uslovima autonomnog određivanja tokova snaga u polaznim ustaljenim stanjima, uz napomenu, da je glavni deo, koji se odnosi na same analize sigurnosti, detaljno dat u [10, 11], u ovom radu predstavljen krajnje simplificirano, preko bloka 6. Ne treba posebno da se naglašava koliko "samostartovanje" analiza sigurnosti ima veliki praktičan značaj, uz unifikaciju programskog paketa i mogućnosti sukcesivnog određivanja tokova snaga u polaznim (blokom 2 i 3) i karakterističnim postdinamičkim kvazistacionarnim stanjima (blok 6) EES-a.

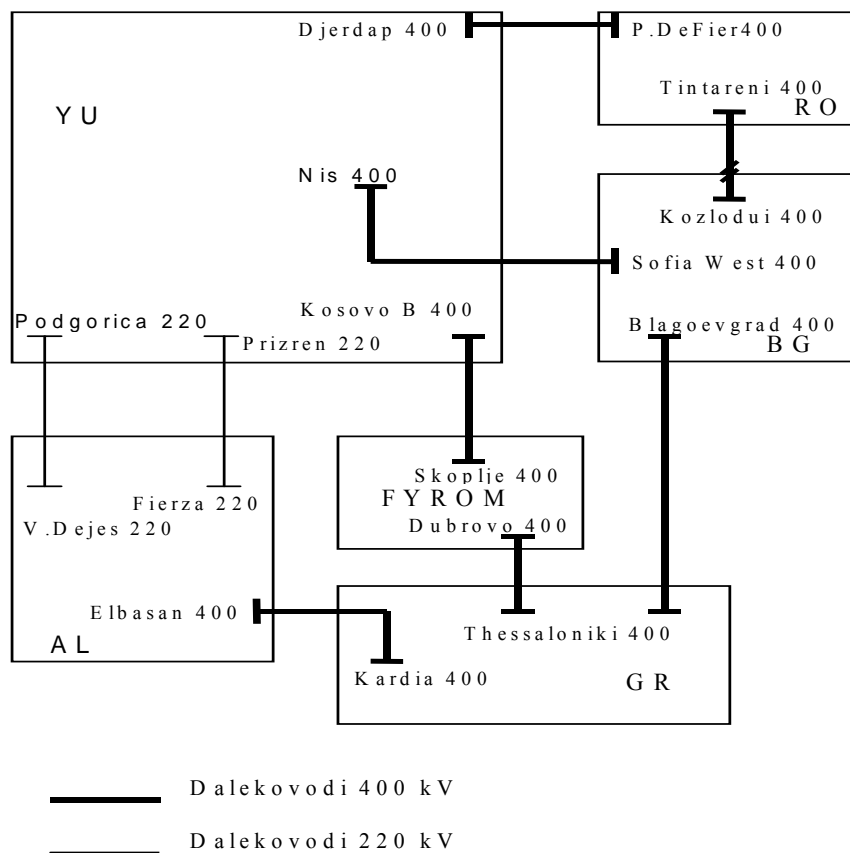


Slika 1: Globalni dijagram toka odvijanja analiza statičke sigurnosti, u uslovima autonomnog određivanja tokova snaga u polaznim ustaljenim stanjima

## 7 PRIMERI PRAKTIČNE PRIMENE RAZVIJENIH POSTUPAKA ZA ODREĐIVANJE TOKOVA SNAGA U POLAZANIM USTALJENIM STANJIMA

Prva iskustva u primeni razvijenih postupaka sticana su na primeru realne interkonekcije, koju sačinjavaju EES Jugoslavije (YU), dela Republike Srpske (RS), Rumunije (RO), Bugarske (BG), Makedonije (MA), Grčke (GR) i Albanije (AL), saglasno podacima iz studije [21]. Drugim rečima, posmatrano je postojeće "ostrvo" na prostorima Balkana ("druga UCPTTE sinhrona zona").

Na slici 2 dat je blok dijagram razmatrane elektroenergetske interkonekcije na prostorima Balkana. 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). Takođe, modelovana je kompletna mreža 110 kV EES-a Srbije i Crne Gore, saglasno podacima iz [22, 23]. Ukupan broj čvorova (N) je iznosio 616, od kojih su 79 bili generatori (NG).



Slika 2: Blok dijagram elektroenergetske interkonekcije na prostorima Balkana

### 7.1. Polazno stanje sa fiksnim "voznim redovima" izvora

Raspoloživi prostor ovoga rada omogućuje izlaganje samo najznačajnijih aspekata kod promocije novih postupaka, a to su, kod postupka ovoga tipa, karakteristike konvergencije rešavanja raspregnutih sistema jednačina (22) i (23). To će biti učinjeno preko tabela 1, 2, 3, 4 i 5, uz napomenu, da je upotrebljen tzv. "flat" start (svi uglovi imaju nultu, a naponi neporoizvodnih čvorova, nominalnu vrednost). Tabele 1, 2, 3 i 4 se odnose na slučaj kada je TE "Nikola Tesla" B usvojena kao referentna elektrana.

U tabeli 1 daje se tok iterativne procedure, praćen maksimalnim apsolutnim vrednostima debalansa aktivne i reaktivne snage ( $\max |\Delta P|$  i  $\max |\Delta Q|$ ), kao i vrednostima debalansa referentnog (balansnog) generatora ( $\Delta P_r$ ). Ovaj debalans se daje za tri početne vrednosti aktivne snage balansnog generatora  $P_{G0r}$  (0, 500 i 1000 MW) i vrednost regulacione konstante u iznosu od 100 MW/Hz.

Tabela 1. Tok iterativne procedure rešavanja sistema jednačina (22) i (23)

| Broj Iteracije | max $ \Delta P $<br>MW | max $ \Delta Q $<br>Mvar | $\Delta P_r$ (MW) |        |        |
|----------------|------------------------|--------------------------|-------------------|--------|--------|
|                |                        |                          | 0                 | 500    | 1000   |
| 0              | 1853.7                 | 2020.5                   | -18.0             | 482.0  | 982.0  |
| 1              | 79.7                   | 59.5                     | -57.5             | -33.7  | -10.0  |
| 2              | 11.7                   | 4.4                      | -25.6             | -24.5  | -23.3  |
| 3              | 0.757                  | 0.306                    | -0.179            | -0.125 | -0.071 |
| 4              | 0.122                  | 0.113                    | -0.202            | -0.199 | -0.196 |
| 5              | 0.021                  | 0.040                    | -0.003            | -0.003 | -0.003 |

U tabeli 2 daju se promene aktivnih snaga referentnog generatora (TENT B), tokom iterativne procedure ( $P_r$  – injektirana snaga;  $P_{G0r-k_{pr}\Delta f}$  - "specificirana" snaga), takođe, za tri početne vrednosti snage balansnog generatora  $P_{G0r}$  (0, 500 i 1000 MW), pri čemu je  $k_{pr}$  imala vrednost 100 MW/Hz.

Tabela 2. Promene aktivnih snaga referentnog čvora tokom iterativne procedure rešavanja sistema jednačina (22) i (23)

| Broj Iteracije | $P_r$<br>MW | $P_{G0r-k_{pr}\Delta f}$ (MW) |        |        |
|----------------|-------------|-------------------------------|--------|--------|
|                |             | 0                             | 500    | 1000   |
| 0              | 18.0        | 0                             | 500.0  | 1000.0 |
| 1              | 826.5       | 769.0                         | 792.8  | 816.5  |
| 2              | 1159.1      | 1133.5                        | 1134.6 | 1135.7 |
| 3              | 1145.6      | 1145.5                        | 1145.5 | 1145.6 |
| 4              | 1148.9      | 1148.7                        | 1148.7 | 1148.7 |
| 5              | 1149.0      | 1149.0                        | 1149.0 | 1149.0 |

U tabeli 3 daju se promene odstupanja "kvazistacionarne vrednosti učestanosti" tokom iterativne procedure, za tri početne vrednosti aktivne snage referentnog generatora  $P_{G0r}$  (0, 500 i 1000 MW) i dve vrednosti njegove regulacione konstante  $k_{pr}$  (100 i 1000 MW/Hz).

Tabela 3. Promene odstupanja "kvazistacionarne vrednosti učestanosti", tokom iterativne procedure rešavanja sistema jednačina (22) i (23)

| Broj Iteracije | $\Delta(\Delta f)(k_{pr}=100\text{MW/Hz})$<br>Hz |        |         | $\Delta(\Delta f)(k_{pr}=1000\text{MW/Hz})$<br>Hz |         |         |
|----------------|--|--------|---------|---|---------|---------|
|                | 0  | 500    | 1000    | 0   | 500     | 1000    |
|                | 1  | -7.691 | -2.928  | 1.835   | -0.7691 | -0.2928 |
| 2              | -3.644   | -3.418 | -3.192  | -0.3644   | -0.3418 | -0.3192 |
| 3              | -0.120   | -0.109 | -0.098  | -0.0120   | -0.0109 | -0.0098 |
| 4              | -0.032   | -0.031 | -0.0031 | -0.0032   | -0.0031 | -0.0031 |
| 5              | -0.003   | -0.003 | -0.003  | -0.0003   | -0.0003 | -0.0003 |

Osetljivost iterativne procedure (praćene promenama veličina  $P_{G0r-k_{pr}\Delta f}$ ,  $\Delta(\Delta f)$  i  $\Delta P_r$ ), na početnu vrednost aktivne snage  $P_{G0r}$  i regulacione konstante  $k_{pr}$  referentnog generatora, daje se u tabeli 4. Oznaka A odnosi se na slučaj kada je  $P_{G0r}=0$  MW  $k_{pr}=0.1$  MW/Hz, a oznaka B slučaj kada je  $P_{G0r}=-500$  MW i  $k_{pr}=100$  MW/Hz.

Tabela 4. Osetljivost iterativne procedure na početnu vrednost aktivne snage i vrednost regulacione konstante referentnog generatora

| Broj Iteracije | $P_{Gor}-k_{pr}\Delta f$<br>MW |        | $\Delta(\Delta f)$<br>Hz |         | $\Delta P_r$<br>MW |        |
|----------------|--------------------------------|--------|--------------------------|---------|--------------------|--------|
|                | A                              | B      | A                        | B       | A                  | B      |
| 0              | 0                              | -500.0 | -                        | -       | -18.0              | -518.0 |
| 1              | 769.0                          | 745.3  | -769.0                   | -12.453 | -57.5              | -81.2  |
| 2              | 1133.5                         | 1132.4 | -3644.4                  | -3.870  | -25.6              | -26.7  |
| 3              | 1145.5                         | 1145.4 | -119.9                   | -0.131  | -0.179             | -.232  |
| 4              | 1148.7                         | 1148.7 | -32.0                    | -0.032  | -0.202             | -0.205 |
| 5              | 1149.0                         | 1149.0 | -2.8                     | -0.003  | -0.003             | -0.003 |

Na kraju, u tabeli 5 daje se osetljivost iterativne procedure na izbor referentnog generatora. Svaki od referentnih generatora imao je  $P_{Gor}=0$  MW i  $k_{pr}=1000$  MW/Hz. U ovoj tabeli daje se ukupan broj iteracija za postizanje tačnosti od 0.1 MW i 0.1 Mvar, finalne vrednosti aktivne snage referentnog generatora  $P_r$  i uspostavljene "kvazistacionarne vrednosti učestanosti" f.

Tabela 5. Osetljivost iterativne procedure na izbor referentnog (balansnog) generatora

| Balansni generator     | Ukupan broj iteracija | $P_r$<br>MW | f<br>Hz |
|------------------------|-----------------------|-------------|---------|
| TENT B (YU)            | 5                     | 1149.0      | 48.851  |
| NE Kozlodui (BG)       | 5                     | 1865.7      | 48.134  |
| NE Cerna Voda (RO)     | 6                     | 654.0       | 49.346  |
| TE Agros Dimitros (GR) | 5                     | 1098.8      | 48.901  |
| TE Bitola (MA)         | 6                     | 288.9       | 49.711  |
| HE Komani (AL)         | 6                     | 329.7       | 49.670  |

Kod interpretacije prikazanih rezultata polazi se od sistema jednačina (22), napisanih u sledećoj formi

$$\Delta \mathbf{P} / \mathbf{V}^k = \mathbf{B}' \Delta \boldsymbol{\theta}^{k+1} \quad (22a)$$

$$\Delta P_r / V_r^k = B_r' \Delta \theta^{k+1} + F_r' \Delta (\Delta f)^{k+1} \quad (22b)$$

Sistem jednačina (22a) pokazuje da se nepoznati vektor uglova  $\theta$  reda (n-1) iterativno određuje na identičan način kao u postupku Stott-Alsac-a [6]. Takođe, saglasno sistemu jednačina (23), i nepoznati vektor modula napona  $V$ , reda NL, određuje se kao u pomenutom postupku. Otuda identičnost karakteristika konvergencije postupka određivanja vektora  $\theta$  i  $V$  posredstvom jednačina (22) i (23) i postupka [6]. Odnosno, one zavise samo od izbora referentnog generatora, a potpuno su invarijantne od njegovih karakteristika (početne snage  $P_{Gor}$  i primarne regulacione konstante  $k_{pr}$ ). Takođe, injektirana snaga referentnog generatora  $P_r$  je invarijanta od njegovih karakteristika.

S druge strane, saglasno relaciji (22b), tok iterativne procedure određivanja odstupanja "kvazistacionarne vrednosti" učestanosti zavisi i od početne snage referentnog generatora  $P_{Gor}$  i od njegove regulacione konstante  $k_{pr}$ . Međutim, tu je moguće uočiti

odgovarajuću praktičnu zakonitost, koja proizilazi iz relacije (22b), napisane na sledeći način

$$P_{GO_r} - k_{pr}(f^k - f_0) = P_i^k + V_r B_r \Delta \theta^{k+1} + \frac{V_r}{V_n} k_{pr}(f^{k+1} - f^k)$$

Uz pretpostavku da je  $V_r \approx V_n$ , ova relacija prelazi u oblik

$$P_{GO_r} - k_{pr}(f^{k+1} - f_0) \approx P_i^k + V_r B_r \Delta \theta^{k+1} \quad (22c)$$

To znači, da za izabrani referentni generator, veličina  $P_{GO_r} - k_{pr} \Delta f^{k+1}$  praktično dobija iste vrednosti tokom iterativne procedure, nezavisno od početne snage  $P_{GO_r}$  i regulacione konstante  $k_{pr}$ . To se najbolje može videti preko pokazatelja datih u tabelama 2 i 4.

Konsekventno tome, za izabranu početnu snagu referentnog generatora  $P_{GO_r}$ , veličina  $k_{pr} \Delta f^{k+1}$ , takođe ima iste vrednosti tokom iterativne procedure, nezavisno od izbora vrednosti regulacione konstante  $k_{pr}$ . O tome govore pokazatelji iz table 3.

Međutim, ono što je potrebno posebno da se naglasi, konvergentne karakteristike razvijenog postupka uopšte ne zavise od izbora početne snage  $P_{GO_r}$  i konstante  $k_{pr}$ , o čemu svedoče pokazatelji izneti u tabeli 4, a što je direktna posledica relacije (22c). Tu je samo u pitanju red veličine "kvazistacionarne vrednosti učestanosti", a koja naravno nema taj fizički smisao, nego je očigledno reč o veštačkoj varijabli.

Na kraju, pokazatelji dati u tabeli 5 pokazuju da sam izbor referentnog (balansnog) generatora praktično ne utiče na veoma dobre karakteristike konvergencije razvijenog postupka određivanja tokova snaga u polaznim ustaljenim stanjima. A one su, kako je to objašnjeno i pokazano, praktično identične karakteristikama konvergencije, koje ima poznati postupak Stott-Alsac-a [6].

## 7.2. Polazno ustaljeno stanje sa specificiranim programima razmene

U cilju ilustracije mogućnosti postupka, baziranog na nekonvencionalnom modelu tokova snaga (jednačine balansa (1), (2), (3), (4), (9) i (10)) i tehnici njegovog rešavanja (sistemi raspregnutih jednačina (19) i (20)), izabran je primer izvoza u iznosu od 600 MW iz Rumunije u Grčku.

Određivanje polaznog stanja, u kojem su svi EES koji se nalaze u interkonekciji imali nulti program razmene, obavljalo se primenom postupka opisanog u poglavlju 5.1. ovoga rada, dakle, na veoma efikasan način.

Zatim, za unapred definisani željeni program razmene (u ovom slučaju, RO→GR 600 MW), vrše se korekcije injektiranja generatora u EES Rumunije i Grčke.

Injektiranje NE Cerna Voda (RO) se povećalo za 600 MW, a injektiranje TE Agros Dimitros (GR) se smanjilo za isti iznos, uz odgovarajuće korekcije parametara generatora i njihovih blok transformatora.

Posle toga, startuje procedura određivanja tokova snaga koji se uspostavljaju nakon dejstva primarne regulacije učestanosti (rešavanje sistema jednačina (19) i (20)), čiji iterativni tok daje tabela 6. Uspostavljena kvazistacionarna vrednost učestanosti (a koja je sada i fizički to) u tom stanju iznosila je 49.998 Hz. Saglasno pokazateljima iznetim u ovoj tabeli, uočavaju se veoma dobre i pouzdane karakteristike konvergencije primenjenog postupka, a koje su već bile potencirane u radu [20].

Odstupanja razmena od utvrđenog programa (RO→GR, 600 MW, a svi ostali EES imali su nulte programe razmene) i iznosi regulacionih grešaka besena, za stanje nakon dejstva primarne regulacije učestanosti, daju se u narednoj tabeli 7.

Tabela 6. Tok iterativne procedure određivanja stanja nakon dejstva primarne regulacije učestanosti, tokom realizacije razmene RO→GR u iznosu od 600 MW

| Broj iteracije | Max $ \Delta P $<br>MW | Max $ \Delta Q $<br>Mvar | $\Delta(\Delta f)$<br>Hz |
|----------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0              | 659.9                  | 105.3                    | -                        |
| 1              | 28.8                   | 4.2                      | -0.00014                 |
| 2              | 1.4                    | 0.250                    | -0.00161                 |
| 3              | 0.056                  | 0.125                    | -0.00022                 |
| 4              | 0.016                  | 0.105                    | -0.00003                 |
| 5              | 0.014                  | 0.063                    | 0.00000                  |

Tabela 7. Odstupanje programa razmene i iznosi regulacionih grešaka nakon dejstva primarne regulacije učestanosti

| Regulacioni basen | $\Delta P_R$<br>MW | RGS<br>Mvar |
|-------------------|--------------------|-------------|
| Jugoslavija       | -10.1              | -16.6       |
| Rumunija          | 19.0               | 13.7        |
| Bugarska          | -8.0               | -12.1       |
| Makedonija        | 0.1                | -0.2        |
| Grčka             | 0.6                | -1.8        |
| Albanija          | -1.5               | -2.2        |

Dakle, da bi se u potpunosti ostvarili željeni programi razmene, neophodna je akcija automatske sekundarne regulacije učestanosti i snaga razmene, čiji efekti se utvrđuju primenom postupka, opisanog u poglavlju 4 ovoga rada. Karakteristični pokazatelji za ovo stanje, nastalo nakon dejstva sekundarne regulacije daju se u tabelama 8 i 9.

Tabela 8 daje promene aktivnih i reaktivnih snaga generatora u regulacionim basenima.

Tabela 8. Ukupne promene aktivnih i reaktivnih snaga izvora nakon dejstva sekundarne regulacije učestanosti i snaga razmene, pri ostvarenju razmene RO→GR u iznosu od 600 MW

| Regulacioni basen | $\Sigma \Delta P_G$<br>MW | $\Sigma \Delta Q_G$<br>Mvar |
|-------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Jugoslavija       | 16.9                      | 104.6                       |
| Rumunija          | -13.4                     | -48.4                       |
| Bugarska          | 12.0                      | 101.0                       |
| Makedonija        | 0.2                       | 11.1                        |
| Grčka             | 2.0                       | 31.4                        |
| Albanija          | 2.3                       | 18.5                        |

Tabela 9 daje tokove aktivnih i reaktivnih snaga po relevantnim interkonektivnim dalekovodima, u polaznom ustaljenom stanju i u stanju nakon dejstva sekundarne regulacije u cilju ostvarenja tačnog iznosa razmene RO→GR u iznosu od 600 MW.

U poređnom analizom rezultata iznetih u tabelama 7 i 8 mogu se sagledati globalni aspekti razmatranog tranzita snage od 600 MW iz Rumunije i Grčku.

U stanju nakon dejstva primarne regulacije, javljaju se regulacione greške, kao posledica promene vrednosti gubitaka aktivne snage u odnosu na polazno stanje, bez ovog tranzita. Pri tom, znak i vrednost regulacionih grešaka (tabela 7) su pravi



indikatori za promene iznosa gubitaka u pojedinim regulacionim basenima. Konačan iznos tih promena gubitaka po regulacionim basenima daje su u tabeli 8, preko vrednosti ukupnih promena aktivnih snaga generatora  $\Sigma\Delta P_G$  (i to, samo regulacionih), a njihov algebarski zbir daje promenu ukupnih gubitaka snage u razmatranoj interkonekciji (u razmatranom slučaju, aktivni gubici se povećavaju za 18.0 MW).

*Tabela 9. Tokovi snaga po relevantnim dalekovodima u polaznom stanju i stanju nakon realizacije razmene RO→GR u iznosu od 600 MW*

| Interkonektivni<br>dalekovod | Polazno stanje |                  | Stanje nakon<br>dejstva sekundarne<br>regulacije |                  |
|------------------------------|----------------|------------------|--|------------------|
|                              | $P_{ij}$<br>MW | $Q_{ij}$<br>Mvar | $P_{ij}$<br>MW                                   | $Q_{ij}$<br>Mvar |
| Đerdap (YU)-P.D.Fier (RO)    | 134.0          | -97.2            | -99.7  | -123.7           |
| Tintareni (RO)-Kozlodui (BG) | 134.0          | -150.7           | 500.3  | -136.6           |
| Niš (YU)-Sofija (BG)         | -74.6          | -129.7           | -103.30  | -125.4           |
| Blagoevgrad (BG)-Solun (GR)  | 58.9           | -19.1            | 396.7  | -38.6            |
| Kosovo (YU)-Skoplje (MA)     | 69.8           | -51.3            | 249.4  | -58.8            |
| Dubrovo (MA)-Solun (GR)      | 69.7           | -37.5            | 248.2  | -51.8            |

Takođe, veoma je indikativan i pokazatelj promena ukupnih reaktivnih snaga generatora  $\Sigma\Delta Q_G$  (tabela 8), nastalih usled razmatranog tranzita snage. A što se tiče njegovog "prenosnog puta", o tome najbolje govore pokazatelji izneti u tabeli 9. Uočava se, da veći iznos tranzitne snage ide preko EES-a Bugarske (366.3 MW, odnosno 61% od snage tranzita), a "ostatak" preko EES-a Jugoslavije (233.7 MW, odnosno 39%).

Naravno, razvijeni postupak omogućuje kreiranje i niza drugih, takođe veoma indikativnih pokazatelja vezanih za analizirani tranzit. Na taj način, na primeru postojeće interkonekcije na prostoru Balkana, pokazana su relevantna svojstva razvijenih postupaka određivanja tokova snaga u polaznim ustaljenim stanjima, baziranim na nekonvencionalnim modelima tokova snaga, a koji su osnova za dalje analize statičke sigurnosti.

## 8 ZAKLJUČCI

U radu su izloženi razvoj i praktična primena dva efikasna postupka za određivanje tokova snaga u polaznim ustaljenim stanjima. Prvi postupak određuje stanje sa unapred zadatim "voznim redovima" izvora, a drugi stanje, koje se "supreponira" na prethodno, u uslovima realizacije niza programa razmene između EES-a koji se nalaze u sinhronom paralelnom radu. Oba ova postupka su bazirana na nekonvencionalnim modelima tokova snaga i tehnikama njihovog rešavanja, na kojima su zasnovane analize statičke sigurnosti EES-a. Na primeru postojeće interkonekcije na prostorima Balkana, utvrđene su veoma dobre njihove karakteristike konvergencije. Na taj način, omogućena je potpuna autonomnost, efikasnost i uniformnost analiza sigurnosti, pri čemu je postignuta visoka tačnost kod razmatranja značajnih, po iznosu i dužini prenosnih puteva, tranzita snaga.

## LITERATURA

- [1] Debs A.S., "Modern Power Systems Control and Operation: A Study of Real-Time Operation of Power Utility Control Centers", Kluwer Academic Publishers, Boston, USA, 1996.

- [2] "Security Analysis (SA)", Siemens Power Systems Control, EPS (10/97), Volume II, Section 3, pp. 3-34-3-46.
- [3] "Real-Time Contingency Analysis (RTCA)", GE Harris Energy Control Systems, pp. 11-9-11-11.
- [4] "Security Analysis with Contingency Selection", Harris Control and Composition Division, pp. 26-40.
- [5] "Static Security Assessment", Landis and Gyr, Confidential and Proprietary Information, pp. 16-31-16-40.
- [6] Stott B., Alsac O., "Fast Decoupled Load Flow", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems PAS, Vol. PAS-93, No. 3, May/June 1974, pp. 859-869.
- [7] "Razvoj aplikacionog programskog paketa za analizu statičke sigurnosti u studijskom modu", studija Instituta "Nikola Tesla", Beograd, juni 1999.
- [8] 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.
- [9] Popović D.P., "An Efficient Methodology for Study-Mode Security Assessment of Power Systems for Large Disturbances", IFAC Symposium Power Systems, Brussels, 5-8. September, 1988, paper 7.4.
- [10] Popović D.P., Dobrijević Đ.M., Mijušković N.A. and Vlaisavljević D.J., "Methodological and Practical Aspects of Steady-State Security Assessment of Yugoslav Power System", IEEE Power Tech '99 Conference, Budapest, Hungary, Aug 29-Sept 2, 1999, Paper BPT99-382-13.
- [11] Popović D.P., Dobrijević Đ.M., Mijušković N.A. i Vlaisavljević D.J., "Metodološki i praktični aspekti studijskih analiza statičke sigurnosti elektroenergetskog sistema Srbije", 24. Savetovanje JUKO CIGRE, Vrnjačka Banja, 1999, referat 39.04, časopis "Elektroprivreda" br.4, 1999.
- [12] Okamura M. et al., "A New Power Model and Solution Method Including Load and Generator Characteristics and Effects of System Control Devices", IEEE Trans., Vol. PAS-94, No. 3, May/June 1975, pp. 1072-1049.
- [13] Lukašov E.S. i dr. "Dugotrajni prelazni procesi u elektroenergetskim sistemima" (Knjiga na ruskom), Izd. "Nauka", Novosibirsk, 1985.
- [14] Saadat M.H., "Steady State Analysis of Power Systems Including the Effects of Control Devices", Electric and Power System Research, Vol. 2, No. 2, June 1979, pp. 111-118.
- [15] Čalović M.S., Strezoski V.C., "Calculation of Steady-State Load Flows Incorporating Systems Control Effects and Consumer Self-Regulation Characteristics", Int. Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 2, No. 2, April 1981, pp- 65-74.
- [16] Strezoski V.C., Viktor L.A., "Jedan matematički model za proračun stacionarnih režima povezanih elektroenergetskih sistema", Elektroprivreda br. 7-8, 1984., s. 308-317.

- [17] Strezoski V.C. Čalović M.S., "Steady-State Security Analysis Assuming Large Generation/Load Disturbances", Proc. of 9<sup>th</sup> Congress of IFAC, Budapest, July 1984, pp. 7-12.
- [18] Liseev M.S. i dr. "Metodika proračuna posthvarsijjskih režima elektroenergetskih sistema" (članak na ruskom), Električevstvo No. 11, 1983, s. 18-23.
- [19] Tinney W.F., Hart C., "Power Flow Solution by Newton's Method", IEEE Trans. Vol. PAS 86, Nov. 1967, pp. 1449-1460.
- [20] Popović D.P., Mijailović S.V., Bulatović S., "A Methodology for Evaluating the Effects of Large Power Transits in Electric Power Systems", Revue Generale de L'Electricite, No. 10, Novembre 1994, p. 1-7.
- [21] "Technical Feasibility Study of Interconnection of the Electric Power Systems of Bulgaria and Romania with the Interconnected Power Systems of Greece, Power Systems under EKC Coordination with UCPTE Regulations and Standards, Part IV: Dynamic Calculations for the Year 1995", Nikola Tesla Institute, Belgrade, July, 1995.
- [22] "Studija dugoročnog razvoja prenosne mreže 400, 220 i 100 kV na području republike Srbije, za period do 2020. godine", Institut "Nikola Tesla", Beograd, 1998.
- [23] "Studija razvoja mreže 110 i 35 kV EES-a Crne Gore (period 1995-2000.god., sa vizijom do 2020.god.), Elektrotehnički Institut "Nikola Tesla", Beograd, 1997

**Abstract:** The paper deals with two efficient procedures of determining initial steady-state power flows preceding the analyses of power system static security. These procedures are fully consistent with the procedure of power flow determination in numerous characteristic postdynamic quasi-stationary states occurring after the considered disturbances. Such a developed procedure characteristic enables complete autonomy and uniformity of security analyses, as well as their successive realisation. The efficiency of proposed procedures is determined on the example of the existing power interconnection in the Balkan region.

## INITIALIZATION OF STEADY-STATE SECURITY ANALYSES OF POWER SYSTEMS

Dragan P. Popović