

# MINIMIZIRANJE GUBITAKA DJELATNE SNAGE NEWTONOVOM METODOM NA PRIMJERU HRVATSKOG EES-a

Mr. sc. Tomislav Plavšić – mr. sc. Vladimir Grujić – dr. sc. Igor Kuzle, Zagreb

UDK 621.315.05:621.3.016.2  
PRETHODNO PRIOPĆENJE

U radu je opisan problem optimalnih tokova snaga s naglaskom na minimiziranje gubitaka djelatne snage. Predloženo je rješavanje problema Newtonovom metodom, tehnikom nelinearnog optimiranja s ograničenjima. Opisana metoda ispitana je na modelu prijenosne mreže Hrvatske. Za ulazne podatke proračuna korišteni su stvarni podaci. Rezultati su pokazali opravdanost optimiranja tokova snaga radi ekonomičnog upravljanja prijenosnom mrežom te održavanja sigurne razine napona u sustavu.

**Ključne riječi:** optimalni tokovi snaga, Newtonova metoda, upravljanje elektroenergetskim sustavom.

## 1. UVOD

Zbog rastućih potreba za električnom energijom te različitih zapreka koje se javljaju pri proširenju postojećih prijenosnih elektroenergetskih mreža, uz razvitak tržišta električne energije i intenziviranje tranzitnih tokova električne energije, suvremeni elektroenergetski sustavi (EES) rade sve bliže i bliže svojim pogonskim ograničenjima. Tokovi snaga po interkonekcijskoj prijenosnoj mreži postaju sve veći i dinamičniji, uzrokujući zagušenja, neželjene tokove i povećane gubitke, utječući tako na sigurnost opskrbe te ekonomičnost prijenosa električne energije.

Osim osiguranja stabilnog rada elektroenergetskog sustava održavanjem frekvencije, operator elektroenergetskog sustava osigurava kvalitetu električne energije i sigurnost opskrbe potrošača održavanjem vrijednosti napona u čvorištima mreže unutar dozvoljenih ograničenja. Predmetni je zahtjev moguće ispuniti preraspodjelom proizvodnje i tokova jalove snage upravljajući automatskim regulatorima napona generatora i regulacijskim sklopkama transformatora s mogućnošću promjene prijenosnog omjera pod opterećenjem (engl. Under-Load Tap Changer – ULTC), te kompenzacijskim uređajima. Optimiranjem raspodjele tokova jalove snage moguće je postići minimiziranje gubitaka djelatne snage pri prijenosu električne energije uz očuvanje sigurne razine napona u elektroenergetskom sustavu.

Problem optimalnih tokova snaga (OTS) predstavljen je još 1962. godine [1]. Pravi razvoj optimalnih tokova snaga započeo je istraživanjima Dommela i Tinneya iz 1968. godine [2, 3], koji su razvili nelinearnu gradijentnu optimizacijsku metodu za određivanje optimal-

nih tokova snaga uz korištenje Kuhn-Tuckerovih uvjeta za optimalnost rješenja. Teorija rijetkih matrica [4] dodatno unaprjeđuje algoritme, a sredinom 80-ih i početkom 90-ih godina značajni rezultati postižu se primjenom nelinearnih optimizacijskih tehnika, točnije Newtonovom metodom [8, 9]. U novije vrijeme sve se više primjenjuje metoda unutarnje točke (engl. interior point method) [10, 11]. U [12] problem optimalnih tokova snaga uspješno je primijenjen na modelu EES-a Ontario Hydro s 381 čvorištem, a u [13] uspješnost proračuna dokazana je na primjeru Tajvanskog elektroenergetskog sustava, s 217 čvorišta, 27 generatora i 65 ULTC transformatora.

Do današnjih dana optimalni tokovi snaga ne samo da nisu izgubili svoju važnost već postaju sve zanimljiviji zbog moguće primjene pri vođenju sustava u stvarnom vremenu [14, 15] koju je omogućio razvoj računalne tehnologije i primjena novih matematičkih algoritama. U novom, liberaliziranom okruženju sve je značajnije višekriterijsko optimiranje [16, 17] koje u sebi istodobno uključuje i ekonomske i sigurnosne kriterije. Osim minimiziranja gubitaka djelatne snage i očuvanja sigurne razine napona u sustavu optimalni tokovi snaga sve se češće koriste i za izračun raspoložive prijenosne moći (engl. available transfer capacity – ATC) prekograničnih vodova, upravljanje zagušenjima na prekograničnim i unutarnjim vodovima, određivanja cijene jalove energije, određivanje cijene korištenja prijenosne mreže ili dodatnih usluga sustava.

U članku je opisan klasičan problem optimalnih tokova snaga te je dan detaljan opis rješavanja problema minimiziranja gubitaka djelatne snage primjenom Newtonove metode. U nastavku su dani numerički rezultati

minimiziranja gubitaka djelatne snage Newtonovom metodom na modelu prijenosne mreže Hrvatske uz uključanje novoizgrađenih objekata TS Ernestinovo 400/110 kV i TS Žerjavinec 400/220/110 kV, te 400 kV poteza kroz BIH unutar modela. Za ulazne podatke proračuna (proizvodnja djelatne i jalove snage elektrana, opterećenja djelatnom i jalovom snagom u svim čvorištima mreže, postavke regulacijskih sklopki ULTC transformatora) korišteni su stvarni podaci iz EES-a Hrvatske. Podaci su preuzeti na temelju snimke stvarnog stanja u 10:30 sati, za karakterističnu srijedu u srpnju 2003., te siječnju 2004.

## 2. PRORAČUN OPTIMALNIH TOKOVA SNAGA

Svrha proračuna optimalnih tokova snaga je određivanje vrijednosti upravljačkih varijabli kako bi se postigao optimalan pogon EES-a, vodeći pri tome računa o očuvanju pogonske sigurnosti EES-a. Optimalan pogon EES-a određen je nekim kriterijem, odnosno funkcijom cilja, uz obvezatno uvažavanje pogonskih ograničenja kao što su minimalna i maksimalna dozvoljena proizvodnja djelatne i jalove snage generatora, maksimalna dozvoljena opterećenja vodova i transformatora te dozvoljena odstupanja vrijednosti napona u čvorištima sustava. Da bi se postiglo rješenje proračun upravlja proizvodnim jedinicama te elementima prijenosnog sustava kao što su transformatori s uzdužnom i/ili poprečnom regulacijom, kompenzacijski uređaji, te različiti FACTS (eng. Flexible AC Transmission System) uređaji. Rješenje proračuna optimalnih tokova snaga uvijek se odnosi na stacionarno pogonsko stanje EES-a, tj. ne razmatra se dinamika sustava i mogući utjecaj prijelazne stabilnosti na sigurnost sustava.

Problem određivanja optimalnih tokova snaga može se matematički formulirati na sljedeći način:

$$\begin{array}{ll} \text{minimizirati skalarnu funkciju cilja} & F(x, u) \\ \text{uz uvjete} & g(x, u) = 0 \\ \text{i} & h(x, u) \geq 0 \end{array}$$

gdje je  $x$  vektor varijabli stanja, a  $u$  vektor upravljačkih varijabli.

Kriterij optimizacije  $F(x, u)$  najčešće je ekonomskog karaktera (npr. minimalni troškovi proizvodnje proizvodnih jedinica ili minimalni gubici djelatne snage), ali može biti i sigurnosnog (maksimiziranje udaljenosti od točke sloma napona, očuvanje stabilnosti sustava uz minimalan broj upravljačkih zahvata ili minimalno potrebno rasterećenje sustava, minimalno narušavanje pogonskih ograničenja), [14].

Skup jednakosti  $g(x, u)$  predstavljaju jednadžbe ravnoteže djelatne, odnosno jalove snage u svakom od čvorišta mreže:

$$P_{Gk} - P_{Lk} - U_k \sum_{m=1}^n [U_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km})] = 0 \quad (1)$$

$$Q_{Gk} - Q_{Lk} - U_k \sum_{m=1}^n [U_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km})] = 0 \quad (2)$$

gdje je  $U$  apsolutna vrijednost napona,  $\theta$  kut napona,  $G$  konduktancija,  $B$  susceptancija,  $P_{Gk}$  proizvodnja djelatne snage u čvorištu  $k$ ,  $Q_{Gk}$  proizvodnja jalove snage u čvorištu  $k$ ,  $P_{Lk}$  potrošnja djelatne snage u čvorištu  $k$ ,  $Q_{Lk}$  potrošnja jalove snage u čvorištu  $k$ .

Skup nejednakosti  $h(x, u)$  odnosi se na fizikalna i pogonska ograničenja koja je potrebno uvažiti kako bi rezultat proračuna OTS imao praktičnog smisla. Ograničenja tipa nejednakosti dijele se u tri osnovne grupe:

1. ograničenja proizvodnje djelatne i jalove snage generatorskih jedinica
2. ograničenja varijabli, npr. ograničenja napona u čvorištima mreže, ograničenja kuta napona, ograničenja prijenosnih omjera regulacijskih transformatora, itd.
3. ograničenja funkcija varijabli, npr. ograničenja tokova snaga po vodovima, ograničenja snaga razmjene, itd.

U stacionarnim pogonskim stanjima tokovi djelatne snage  $P$  tijesno su povezani s kutevima napona  $q$ , dok su tokovi jalove snage  $Q$  tijesno povezani s iznosima napona čvorišta  $U$ . Međusoban utjecaj  $P$ - $\theta$  i  $Q$ - $U$  skupova varijabli je pri tome vrlo slab. Stoga se ovi skupovi varijabli mogu promatrati odvojeno, te se govori o  $P$ - $\theta$ , odnosno o  $Q$ - $U$  pod problemu. Takav se pristup još naziva neulančeni ili razdvojeni (eng. *decoupled*). U literaturi je razdvojeni pristup vrlo često korišten pri rješavanju problema OTS, [7, 8, 14].

Podjelom sustava na  $P$ - $\theta$ , odnosno  $Q$ - $U$  podsustav, dolazi i do podjele upravljačkih i varijabli stanja, te ograničenja. Proračun OTS određuje vrijednosti  $P$ - $\theta$  upravljačkih varijabli minimiziranjem funkcije  $P$ - $\theta$  varijabli uz zadovoljenje  $P$ - $\theta$  ograničenja. Tijekom optimizacije  $Q$ - $U$  varijable su konstantne, izuzev napona onih generatorskih čvorišta čiji su generatori dosegli donje ili gornje ograničenje proizvodnje jalove snage. Na jednak se način izvodi proračun optimalnih tokova jalove snage. Upravljačke varijable i ograničenja mogu se podijeliti na sljedeći način:

*$P$ - $\theta$  upravljačke varijable:* proizvodnja djelatne snage generatorskih jedinica, snage razmjene, podešenja transformatora s mogućnošću promjene kuta (eng. phase shifter), tokovi djelatne snage HVDC (eng. High Voltage DC) vodova, rasterećenje sustava

*$Q$ - $U$  upravljačke varijable:* naponi generatorskih čvorišta, proizvodnja jalove snage sinkronih kompenzatora i statičkih VAR sustava, postavke kondenzatorskih baterija, položaj regulacijske sklopke ULTC transformatora

*P-θ ograničenja:* ograničenja *P-θ* upravljačkih varijabli, kut napona između određenih čvorišta, tokovi djelatne snage po vodovima, pričuva djelatne snage, tokovi djelatne snage razmjene, proizvodnja djelatne snage određenog područja

*Q-U ograničenja:* ograničenja *Q-U* upravljačkih varijabli, vrijednost napona čvorišta, proizvodnja jalove snage, tokovi jalove snage po vodovima, pričuva jalove snage, tokovi jalove snage razmjene.

Više je prednosti korištenja ulančenog pristupa proračuna OTS, [14]:

- znatno povećanje računске učinkovitosti proračuna,
- mogućnost korištenja različitih optimizacijskih algoritama za rješavanje *P-θ* odnosno *Q-U* podproblema,
- mogućnost određivanja različite frekvencije izvođenja proračuna pri on-line primjeni optimalnih tokova snaga. *P-θ* upravljačke varijable potrebno je češće namještati kako bi se zadovoljili ekonomski kriteriji, dok se *Q-U* upravljačke varijable namještaju rjeđe, kako bi se osigurao siguran pogon uz zadovoljenje zadanog kriterija nakon određene promjene u sustavu.

Istodobno namještanje *P-θ* i *Q-U* upravljačkih varijabli naziva se “cjeloviti” proračun OTS. Tijekom poremećenih pogonskih stanja i stanja oporavka, gdje je potrebna raspodjela tokova snaga velikih razmjera, cjeloviti proračun OTS može biti nužan, kao i kod EES-a kod kojih je znatnije izražen međusobni utjecaj *P-θ* i *Q-U* varijabli.

### 3. MINIMIZIRANJE GUBITAKA DJELATNE SNAGE NEWTONOVOM METODOM

Dok se optimalna raspodjela djelatnih snaga po elektranama, a time i optimalna raspodjela tokova snaga po mreži, izvodi prema ekonomskim kriterijima, za optimalnu raspodjelu jalove snage po izvorima jalove snage u sustavu, te preraspodjelu tokova jalove snage ULTC transformatorima, mogu se postaviti sljedeći kriteriji:

- očuvanje sigurne razine napona u sustavu što ujednačenijim naponima u svim čvorištima mreže unutar dozvoljenih ograničenja i
- minimiziranje gubitaka djelatne snage.

Primjenom kriterija minimalnih gubitaka uz uvažavanje odgovarajućih naponskih ograničenja oba navedena kriterija su zadovoljena.

Rješavanje problema OTS primjenom Newtonove metode predstavlja problem nelinearne optimizacije uz ograničenja (eng. non-linear constrained optimization) te zahtijeva oblikovanje Lagrangeove funkcije  $L(z)$ , [8, 9]:

$$L(z) = F(y) + \lambda^T g(y) + \mu^T h(y) \quad (3)$$

gdje je  $y = [x \ u]$ ,  $z = [y \ \lambda \ \mu]$ ,  $l$  i  $m$  su vektori Lagrangeovih množitelja.

Vrijednosti vektora  $y$ ,  $\lambda$  i  $\mu$  određuju se iteracijskim postupkom rješavanjem matrične jednadžbe:

$$H(z) \times \Delta z = -G(z) \quad (4)$$

$G$  je gradijentni vektor prvih parcijalnih derivacija Lagrangeove funkcije po elementima vektora  $z$ :

$$G = \nabla L(z) = \begin{bmatrix} \nabla L_y \\ \nabla L_\lambda \\ \nabla L_\mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial y} \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial L}{\partial \mu} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Matrica drugih parcijalnih derivacija Lagrangeove funkcije po elementima vektora  $z$  naziva se Hessianova matrica  $H$ :

$$H = \nabla^2 L(z) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 L(z)}{\partial y_i \partial y_j} & \frac{\partial^2 L(z)}{\partial y_i \partial \lambda_j} & \frac{\partial^2 L(z)}{\partial y_i \partial \mu_j} \\ \frac{\partial^2 L(z)}{\partial \lambda_i \partial y_j} & 0 & 0 \\ \frac{\partial^2 L(z)}{\partial \mu_i \partial y_j} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$i = 1, \dots, N + M; j = 1, \dots, N + M$$

Dimenzija Hessianove matrice je  $(N+M) \times (N+M)$ , gdje je  $N$  broj upravljačkih varijabli i varijabli stanja, a  $M$  broj Lagrangeovih množitelja. Uočljiva je rijetkost Hessianove matrice te je pri rješavanju jednadžbe (4) nužno koristiti tehnike za upravljanje rijetkim matricama, [4].

Kuhn-Tuckerov teorem daje nužne uvjete za optimalnost rješenja:

$$\nabla_y L(z^*) = 0;$$

$$\nabla_\lambda L(z^*) = 0;$$

$$\nabla_\mu L(z^*) = 0;$$

$$\mu_i^* \geq 0 \text{ ako je } h(y^*) = 0 \text{ (ograničenje je aktivno),}$$

$$\mu_i^* = 0 \text{ ako je } h(y^*) \leq 0 \text{ (ograničenje nije aktivno),}$$

$$\lambda_i^* = \text{Realno,}$$

gdje je  $z^* = [y^* \ \lambda^* \ \mu^*]$  optimalno rješenje.

Tok postupka rješavanja optimizacijskog problema Newtonovom metodom je sljedeći:

1. Određivanje početnih vrijednosti elemenata vektora  $z$  (elementi vektora  $y$  mogu biti jednaki kao kod klasič-

nog proračuna tokova snaga, a vrijednosti Lagrangeovih množitelja mogu biti 0) i početnih aktivnih ograničenja,

2. oblikovanje Lagrangeove funkcije  $L(z)$  na temelju danih aktivnih ograničenja,
3. proračun prvih i drugih parcijalnih derivacija Lagrangeove funkcije po elementima vektora  $z$ , oblikovanje Hessianove matrice  $H$  i gradijentnog vektora  $G$ ,
4. rješavanje matrične jednadžbe  $H(z) \times \Delta z = -g(z)$  po  $\Delta z$ ,
5.  $z^{k+1} = z^k + \Delta z$ ,
6. provjera ispunjenosti Kuhn-Tuckerovih nužnih uvjeta optimalnosti; ako nisu ispunjeni - povratak na korak 3,
7. provjera ispravnosti aktiviranih ograničenja; ako su sva ograničenja ispravno aktivirana problem je riješen; ako ne – izvesti aktiviranje, odnosno deaktiviranje, potrebnih ograničenja, povratak na korak 2.

Lagrangeova funkcija uključuje samo ona ograničenja tipa nejednakosti koja su trenutno aktivna. Ograničenje određene varijable, upravljačke ili varijable stanja, aktivno je u slučaju da varijabla tijekom proračuna dosegne minimalnu ili maksimalnu vrijednost. Dok je ograničenje aktivno predznak pripadajućeg Lagrangeovog množitelja određuje da li je daljnje aktiviranje ograničenja nužno. Lagrangeov množitelj može se definirati kao negativna vrijednost derivacije funkcije cilja po ograničenju kojem je pridružen [8]. Ako je predznak pozitivan daljnje će nametanje ograničenja dovesti do smanjivanja vrijednosti funkcije cilja, te ograničenje ostaje aktivno. Ako je predznak negativan daljnje nametanje ograničenja uzrokovat će povećanje vrijednosti funkcije cilja, te ga je potrebno deaktivirati.

Jedan od problema koji se može javiti pri izvođenju optimizacijskog proračuna Newtonovom metodom je nepostojanje prihvatljivog rješenja, što kod proračuna optimalnih tokova snaga znači da takvo rješenje pogonski nije moguće ostvariti. Razlog tomu najčešće je preveliki broj nametnutih ograničenja, što dovodi do toga da ne postoji prihvatljivo rješenje koje zadovoljava sva nametnuta ograničenja. Drugi se problem javlja kada je, npr., aktivirano ograničenje vrijednosti napona u nekom čvorištu. Takav uvjet utječe na promjenu vrijednosti napona u okolnim čvorištima. Istodobno aktiviranje ograničenja vrijednosti napona u više susjednih čvorišta ima za posljedicu isprekidane tokove snaga, a time i divergenciju proračuna.

Opisane probleme moguće je riješiti korištenjem mekih ograničenja. Meko ograničenje znači da ograničenje nije varijabli u potpunosti nametnuto već je dopuštena određena tolerancija oko granične vrijednosti. Takvo se ograničavanje varijable postiže dodavanjem tzv. "kaznene" funkcije (eng. *penalty function*) funkciji cilja. Vrijednost kaznene funkcije je mala kada je vrijednost varijable blizu vrijednosti ograničenja, a raste velikom

brzinom kako se vrijednost varijable udaljava od vrijednosti ograničenja u neželjenom smjeru. Kaznena funkcija može biti linearna ili kvadratna. Linearna kaznena funkcija (eng. *linear penalty function*) ima sljedeći oblik:

$$PF = k \cdot (\max(0, x - x_{MAX}) - \min(0, x - x_{MIN})) \quad (7)$$

gdje je  $y$  varijabla, a  $k$  težinski koeficijent koji određuje mekoću ograničenja. Za velike vrijednosti faktora  $k$  kaznena funkcija ponaša se kao čvrsto ograničenje. U literaturi faktor  $k$  često se naziva i faktor penaliziranja [14]. Kvadratna kaznena funkcija (eng. *quadratic penalty function*) ima oblik:

$$PF = k \cdot \left( y - \frac{(y_{MIN} + y_{MAX})}{2} \right)^2 \quad (8)$$

Kaznenu funkciju moguće je primijeniti na pogonski ograničene varijable (npr. napon čvorišta), dok su fizikalna ograničenja varijabli (npr. regulacijski opseg transformatora ili proizvodnja jalove snage generatora) uvijek čvrsta.

Problem minimiziranja gubitaka djelatne snage primjenom Newtonove metode, optimiranjem tokova jalove snage (razdvojeni pristup), matematički je formuliran na sljedeći način:

funkcija cilja minimiziranja gubitaka djelatne snage

$$F(x, u) = P_{GUB} = \sum_i^n \sum_j^n U_i U_j G_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (9)$$

gdje  $P_{GUB}$  označava gubitke djelatne snage sustava.

ograničenja tipa jednakosti

$$g_i(x, u) = \left( \begin{array}{l} -U_i^2 B_{ii} + U_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ -Q_{Gi} + Q_{Li} \end{array} \right) = 0 \quad (10)$$

ograničenja tipa nejednakosti

1. Ograničenje proizvodnje/potrošnje jalove snage generatora

$$Q_{GiMIN} < Q_{Gi} < Q_{GiMAX} \quad (11)$$

gdje je  $Q_G$  jalova snaga koja se proizvodi/troši u generatoru

## 2. Ograničenje vrijednosti napona u čvorištima mreže

$$U_{iMIN} < U_i < U_{iMAX} \quad (12)$$

gdje je  $U_i$  apsolutna vrijednost napona u čvorištu  $i$

## 3. Ograničenje regulacijskog opsega ULTC transformatora

$$t_{ijMIN} < t_{ij} < t_{ijMAX} \quad (13)$$

gdje je  $t$  prijenosni omjer ULTC transformatora

## 4. Ograničenje prijenosne moći vodova

$$|S_{ij}|^2 - |S_{ijMAX}|^2 \leq 0 \quad (14)$$

gdje je  $S_{ij}$  prividna snaga koja teče vodom između čvorišta mreže  $i$  i  $j$

Varijable stanja su naponi PQ čvorišta (potrošačka čvorišta), a upravljačke varijable naponi PV čvorišta (čvorišta s proizvodnjom) te prijenosni omjeri ULTC transformatora.

Newtonova metoda je vrlo učinkovit matematički algoritam i često korišten u literaturi [8, 9, 12], prvenstveno radi brze konvergencije u okolici rješenja. To je svojstvo posebno značajno kod proračuna optimalnih tokova snaga jer je jednostavno postaviti početne uvjete koji će biti blizu rješenju. Naponi čvorišta postavljaju se na nazivnu vrijednost, proizvodnju jalove snage generatora moguće je procijeniti, a prijenosni omjeri regulacijskih transformatora postavljaju se oko 1.0 p.u. Dodatne značajke su neovisnost vremena izvođenja proračuna i memorijskih zahtjeva o broju upravljačkih varijabli i broju ograničenja, primjenjivost na osnovne tipove optimizacije u EES-u (minimalni troškovi proizvodnje, optimalna raspodjela djelatne odnosno jalove tokova snaga) te nepotrebnost intervencije korisnika tijekom izvođenja proračuna. Korištenje ulančenog pristupa zadovoljava u najvećem broju slučajeva.

Nedostatak metode predstavlja nepostojanje sustavnog postupka određivanja skupa aktivnih ograničenja. U slučaju ispravno određenog skupa aktivnih ograničenja Newtonova metoda konvergiraće vrlo brzo. Ipak, skup aktivnih ograničenja nije unaprijed poznat te je potrebno koristiti određene heurističke metode za njegovo određivanje. Vrlo često se koriste tzv. probne iteracije (eng. *trial iterations*) između glavnih iteracija proračuna. Meko ograničavanje funkcija varijabli korištenjem kaznene funkcije nije preporučljivo.

U literaturi se preporučuje korištenje Newtonove metode kod minimiziranja gubitaka djelatne snage optimalnom raspodjelom tokova jalove snage [14]. Ovaj se tip optimizacije smatra vrlo problematičnim, prvenstveno zbog velikog broja ograničenja koje treba uvažiti, uz nepromjenjivu proizvodnju djelatne snage. Preporu-

ka je da se u proračunu teži lokalnom minimumu, a nika-ko globalnom, koji za posljedicu može imati preopsežnu raspodjelu tokova jalovih snaga i time ugrožavanje sigurnosti pogona EES-a.

## 4. NUMERIČKI REZULTATI

Opisani algoritam minimiziranja gubitaka djelatne snage Newtonovom metodom ispitan je na modelu prijenosne mreže Hrvatske, s ukupno 143 čvorišta. Proizvodnja elektrana, opterećenja djelatnom i jalovom snagom u svim čvorištima mreže, te postavke regulacijskih sklopki transformatora s regulacijom pod opterećenjem preuzeti su na temelju snimke stvarnog stanja u EES-u Hrvatske u 10:30 (karakteristično vrijeme prema UCTE), za dvije karakteristične (treće) srijede, jednu u ljetnom razdoblju 2003. godine, 16. 7. 2003., a drugu u zimskom razdoblju 2004. godine, 21. 1. 2004. Razlika korištenog modela u odnosu na preuzeto stvarno stanje EES-a Hrvatske je uvrštenje novoizgrađenih objekata TS Ernestinovo 400/110 kV i TS Žerjavinec 400/220/110 kV, te 400 kV poteza kroz BIH unutar modela, slika 1. Računati gubici djelatne snage ne uključuju gubitke na transformatorima 110/x kV jer isti nisu obuhvaćeni modelom.

Proračuni su izvedeni korištenjem profesionalnog programskog paketa PSS/E. Granične vrijednosti napona u čvorištima mreža postavljene su sukladno propisanim ograničenjima [18]. Za ograničavanje vrijednosti napona u čvorištima korištene su linearna i kvadratna kaznena funkcija. Proračuni su napravljeni uz tri različita faktora penaliziranja ( $k$ ) za svaku od kaznenih funkcija te je dana usporedba dobivenih vrijednosti, tablica 5. Korištena su stvarna termička ograničenja vodova, te stvarna ograničenja proizvodnje jalove snage elektrana i regulacijskog opsega transformatora s regulacijom pod opterećenjem.

Za karakterističnu srijedu 16.7.2003., u 10:30, uz ukupno opterećenje sustava od 1731 MW, smanjenje gubitaka djelatne snage dano je u tablici 5. Najveće smanjenje gubitaka dobiveno je, očekivano, uz najmekša ograničenja (linearna kaznena funkcija, faktor penaliziranja = 1). Pri tome su proračunata optimalna podešenja primarnih regulatora napona na generatorima u pogonu te optimalna podešenja regulacijskih preklopki transformatora s regulacijom pod opterećenjem. U tablici 1 dana je usporedba napona i jalove snage u čvorištima angažiranih elektrana prije i nakon optimizacije, a u tablici 2 dana je usporedba prijenosnog omjera te opterećenja transformatora s regulacijom pod opterećenjem prije i nakon optimizacije. U tablici 1 pozitivna vrijednost jalove snage označava proizvodnju, a negativna vrijednost potrošnju jalove snage generatora. Primjetan je izraziti kapacitivni rad generatora čemu su razlog slabo opterećeni vodovi (posebno 400 kV DV Žerjavinec – Ernestinovo) koji pri tome generiraju znatnu količinu jalove snage. Iako nije realno za očekivati ovakav režim rada generatora važno je uočiti promjenu



Slika 1. Prikaz modela prijenosne mreže Hrvatske s okruženjem korištenog u proračunu

proizvodnje/potrošnje jalove snage generatora kao rezultata optimiranja. U tablici 2 pozitivna vrijednost jalove snage označava smjer energije od višeg ka nižem naponu, a negativna vrijednost smjer energije od nižeg ka višem naponu.

Budući da je bitan uvjet pri optimiranju tokova jalove snage očuvanje sigurne razine napona u sustavu postavljanjem ograničenja na vrijednosti napona u čvorištima mreže, usporedba naponskog profila u mreži prije i na-

kon optimizacije nužna je za konačnu ocjenu uspješnosti proračuna. Korištenje mekših ograničenja napona (linearna kaznena funkcija), uz faktor penaliziranja 1, za posljedicu ima manje gubitke u mreži, ali povećanu razinu napona, slika 2, u odnosu na korištenje čvršćih ograničenja (kvadratna kaznena funkcija), slika 3. Iz slika je vidljivo da je proračun održao zadovoljavajuću razinu napona u mreži, čak vrlo sličnu stanju prije optimizacije.

**Tablica 1. Usporedba napona i jalove snage u čvorištima angažiranih elektrana prije i nakon optimizacije za karakterističnu srijedu 16. 7. 2003., uz linearno ograničenje napona ( $k=1$ )**

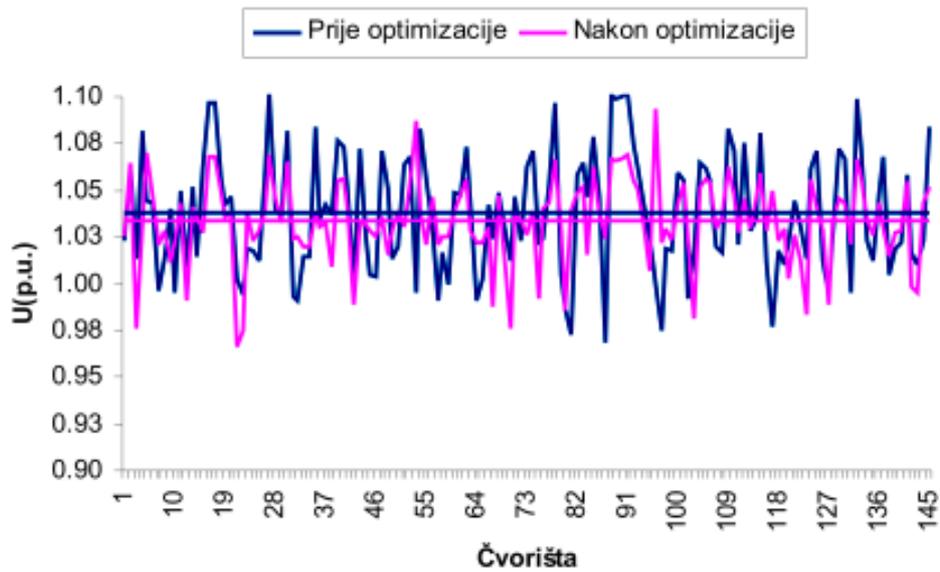
Elektrana	Proizvodnja	Početno stanje		Optimalno stanje		$\Delta Q$
		U	Q	U	Q	
	MW	kV	Mvar	kV	Mvar	Mvar
HE SENJ 220kV	70	228.14	-3.70	222.05	-29.30	-25.60
HE ORLOVAC	50	238.49	0.00	228.67	1.20	1.20
HE PERUČA	37	113.86	16.00	113.38	-6.37	-22.37
HE ZAKUČAC 110kV	165	112.78	-30.00	113.51	-28.00	2.00
HE DUBROVNIK	100	110.00	2.00	120.30	17.51	15.51
HE ČAKOVEC	41	109.23	-14.24	112.64	1.19	15.43
HE VARAŽDIN	78	110.55	30.00	113.08	12.79	-17.21
HE DUBRAVA	40	109.00	-14.15	112.81	1.36	15.51
TE JERTOVEC	60	112.20	-5.10	114.30	-7.95	-2.85
PTE OSIJEK	20	120.90	-10.00	117.21	-8.85	1.15
TE RIJEKA	285	226.80	26.50	222.64	-40.78	-67.28
TE PLOMIN 2	215	224.80	42.37	220.66	32.47	-9.90
TE SISAK 2	117	222.90	19.70	216.28	-14.80	-34.50
EL-TO	21	111.40	-10.50	113.15	16.35	26.85
TE-TO	174	111.10	-92.15	113.26	-39.00	53.15
NE KRŠKO	586	394.80	-195.10	394.32	-104.30	90.80

**Tablica 2. Usporedba prijenosnog omjera i opterećenja ULTC transformatora prije i nakon optimizacije za karakterističnu srijedu 16. 7. 2003., uz linearno ograničenje napona ( $k=1$ )**

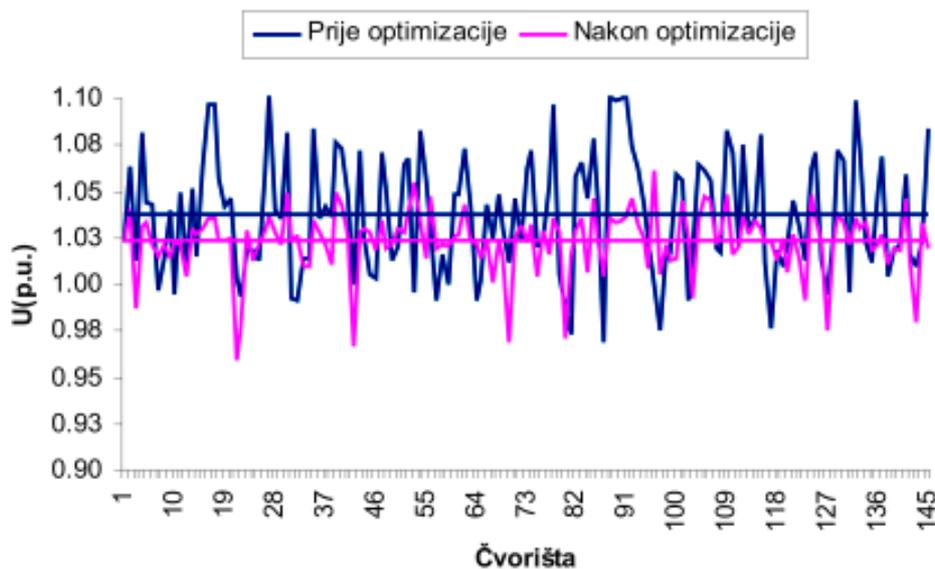
Postrojenje	Početno stanje					Optimalno stanje					Promjena prij. omjera
	$U_1$	$U_2$	Opterećenje		Prij. omjer ( $U_1/U_2$ )	$U_1$	$U_2$	Opterećenje		Prij. omjer ( $U_1/U_2$ )	
	kV	kV	MW	Mvar		kV	kV	MW	Mvar		%
BILICE 220/115	238.00	114.86	74	-12.4	1.0875	227.28	117.67	83.2	20.2	1.0000	-8.75
ERNESTINOVO 400/115	424.14	121.27	124.8	31.4	1.0000	415.84	117.56	119.4	11.0	1.0125	1.25
ĐAKOVO 220/115	233.85	120.66	47.6	-8.4	1.0250	225.99	117.41	47.6	-1.8	1.0000	-2.50
KONJSKO 220/115	238.16	113.31	16.8	43.2	1.1000	228.31	115.11	17.6	82.0	1.0375	-6.25
MEĐURIĆ 220/115	225.33	115.30	19.2	-16.6	1.0250	217.38	115.26	20.7	-2.0	0.9875	-3.75
MELINA 220/115	226.58	115.12	63.6	-5.4	1.0250	222.64	114.21	64.7	6.2	1.0250	0.00
MRACLIN 220/115	224.58	112.66	60	-16.5	1.0500	218.28	114.42	71.2	33.0	1.0000	-5.00
PEHLIN 220/115	225.46	114.79	67.4	22.4	1.0250	221.44	113.61	68.0	24.1	1.0250	0.00
ŽERJAVINEC 400/231	403.43	223.54	35.1	-22.6	1.0500	398.23	219.67	52.2	14.7	1.0500	0.00
ŽERJAVINEC 400/115	403.43	112.57	85.5	79.2	1.0250	398.23	114.77	102.6	69.2	1.0000	-2.50

Za karakterističnu srijedu 21. 1. 2004., u 10:30, uz ukupno opterećenje sustava od 2032 MW, smanjenje gubitaka djelatne snage dano je u tablici 5. Usporedba naponskog profila u mreži prije i nakon optimizacije dana je na slici 4, uz korištenje linearnog ograničenja napona i faktor penaliziranja 1, odnosno na slici 5 uz korištenje kvadratnog ograničenja napona i faktor penaliziranja 1. Iz slika 4 i 5 vidljiv je utjecaj čvrstoće

ograničenja napona pri čemu uz linearno ograničenje proračun daje neznatno povišenu razinu napona u mreži, dok je uz kvadratno ograničenje napona razina napona u mreži snižena. Zaključak je da proračun optimalnih tokova snaga može, uz pravilno postavljena ograničenja, osigurati uravnoteženost naponskog profila EES-a, a time i povećati sigurnost pogona.



Slika 2. Usporedba naponskog profila u mreži prije i nakon optimizacije za 16. 7. 2003., uz linearno ograničenje napona ( $k=1$ )



Slika 3. Usporedba naponskog profila u mreži prije i nakon optimizacije za 16. 7. 2003., uz kvadratno ograničenje napona ( $k=1$ )

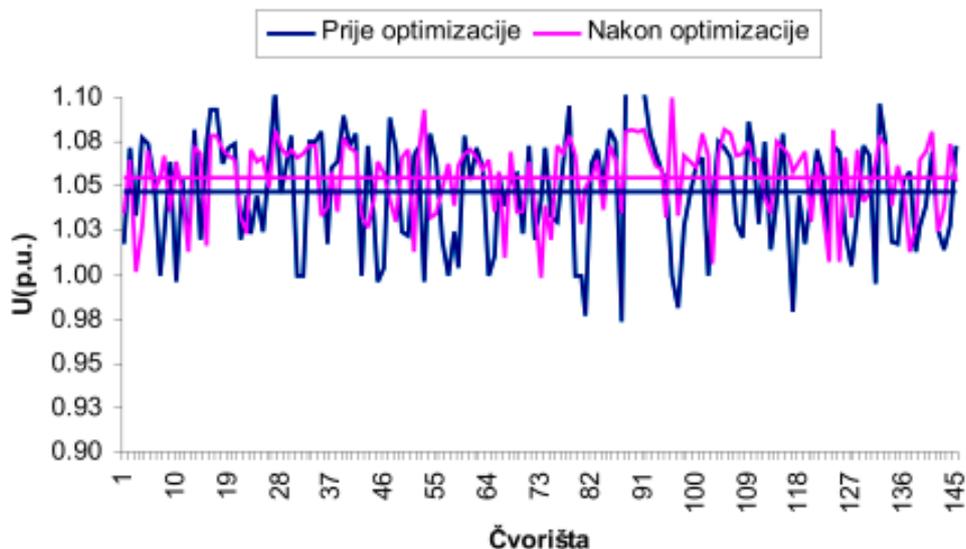
Usporedba napona i jalove snage u čvorištima angažiranih elektrana prije i nakon optimizacije dana je u tablici 3, a usporedba prijenosnog omjera te opterećenja transformatora s regulacijom pod opterećenjem prije i nakon optimizacije dana je u tablici 4.

## 5. ZAKLJUČAK

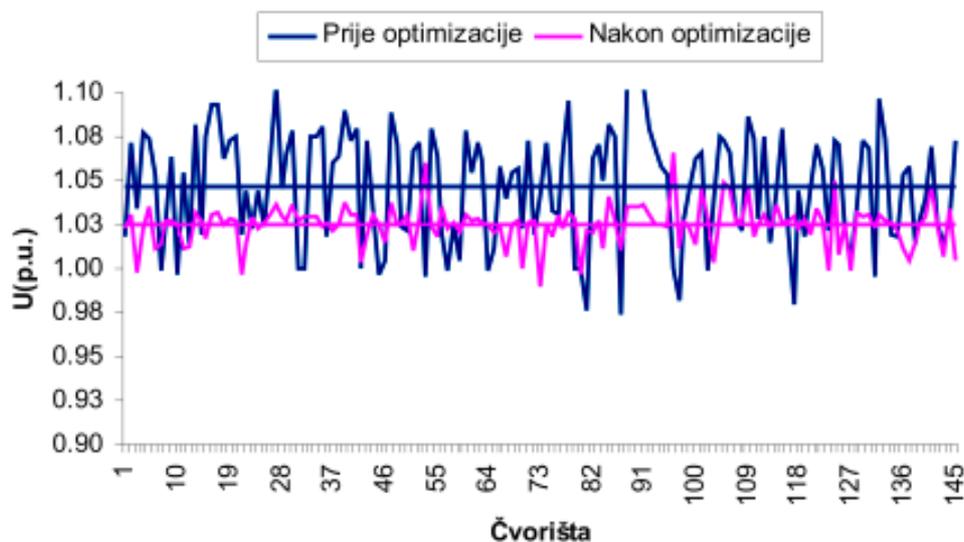
Numerički rezultati optimiranja tokova snaga Newtonovom metodom na modelu Hrvatskog EES-a doka-

zuju uspješnost ove metode u minimiziranju gubitaka djelatne snage te održavanja ujednačenog i stabilnog naponskog profila u čitavoj mreži. Ujedno, dobiveni rezultati ukazuju i na potrebu uvođenja proračuna optimalnih tokova snaga u proces vođenja sustava u realnom vremenu.

U provedenim proračunima unutar modela uključeni su i novoizgrađeni objekti TS Ernestinovo 400/110 kV i TS Žerjavinec 400/220/110 kV, te 400 kV potez kroz BiH, iako zbog toga rezultate nije moguće usporediti



Slika 4. Usporedba naponskog profila u mreži prije i nakon optimizacije za 21. 1. 2004., uz uz linearno ograničenje napona ( $k=1$ )



Slika 5. Usporedba naponskog profila u mreži prije i nakon optimizacije za 21. 1. 2004., uz kvadratno ograničenje napona ( $k=1$ )

sa stvarnim stanjem sustava. Budući da će spomenuti objekti, u vrijeme objavljivanja članka, biti u pogonu, njihovo uvrštenje unutar modela je opravdano. Prezentirane proračune u budućnosti je potrebno proširiti s obzirom na rekonstrukciju I i II UCTE sinkrone zone te njen utjecaj na tokove snaga u Hrvatskom EES-u. Kao rezultat detaljnijih proračuna s obzirom na različita pogonska stanja elektroenergetskog sustava Hrvatske i usporedbe rezultata sa stvarnim stanjima EES-a moći će se donijeti i konkretni zaključci o koristi optimiranja tokova snaga u Hrvatskom EES-u te mogućnosti uvođenja koordiniranog nadređenog sustava upravljanja

automatskim regulatorima napona generatorskih jedinica i transformatora s mogućnošću regulacije pod opterećenjem s ciljem ekonomičnog i sigurnog vođenja EES-a.

#### LITERATURA

- [1] J. CARPIENTER, "Contribution e l'étude do dispatching économique", *Bulletin Society Française Electriciens*, Vol. 3, August 1962.
- [2] H. W. DOMMEL, W. F. TINNEY, "Optimal Power Flow Solutions", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-87, No. 10, October 1968, pp. 1866-1876.

**Tablica 3. Usporedba napona i jalove snage u čvorištima angažiranih elektrana prije i nakon optimizacije za karakterističnu srijedu 21. 1. 2004., uz linearno ograničenje napona ( $k=1$ )**

Elektrana	Proizvodnja	Početno stanje		Optimalno stanje		$\Delta Q$
		$U$	$Q$	$U$	$Q$	
	MW	kV	Mvar	kV	Mvar	Mvar
HE GOJAK	48	118.25	21.00	117.98	-0.45	-21.45
HE RIJEKA	39	116.60	-17.70	116.41	-15.06	2.64
HE SENJ 220kV	70	234.08	34.90	227.72	-21.65	-56.55
HE SENJ 110kV	140	119.90	-27.30	118.53	-4.63	22.67
HE SKLOPE	20	117.96	-10.00	117.85	-2.25	7.75
HE VINODOL	37	118.80	6.90	117.63	-8.03	-14.93
RHE VELEBIT	136	419.84	-60.00	414.56	-56.45	3.55
HE PERUČA	20	111.98	1.50	114.14	4.24	2.74
HE ZAKUČAC 220kV	150	236.06	32.20	225.76	-11.04	-43.24
HE ZAKUČAC 110kV	142	113.63	32.40	114.63	-6.33	-38.73
HE DUBROVNIK	100	110.00	0.00	120.98	15.64	15.64
HE ČAKOVEC	39	110.00	11.10	117.33	9.40	-1.70
HE VARAŽDIN	80	110.00	-5.00	117.41	15.50	20.50
HE DUBRAVA	39	110.00	-10.10	117.52	5.35	15.45
TE-TO OSIJEK	23	121.66	-10.00	118.95	-8.71	1.29
TE PLOMIN 1	105	117.81	-27.30	117.07	-9.29	18.01
TE PLOMIN 2	202	229.90	-11.50	226.69	1.68	13.18
TE SISAK 1	108	118.03	7.80	119.05	-19.77	-27.57
EL-TO	76	112.64	31.60	117.29	20.20	-11.40
TE-TO	176	111.98	-90.00	117.67	18.14	108.14
NE KRŠKO	681	400.00	-137.00	411.72	-108.56	28.44

**Tablica 4. Usporedba prijenosnog omjera i opterećenja ULTC transformatora prije i nakon optimizacije za karakterističnu srijedu 21. 1. 2004., uz linearno ograničenje napona ( $k=1$ )**

Postrojenje	Početno stanje					Optimalno stanje					Promjena prij. omjera
	$U_1$	$U_2$	Opterećenje		Prij. omjer	$U_1$	$U_2$	Opterećenje		Prij. omjer	
	kV	kV	MW	Mvar	( $U_1/U_2$ )	kV	kV	MW	Mvar	( $U_1/U_2$ )	%
BILICE 220/115	236.98	118.11	61.8	10.3	1.0500	225.94	117.78	63.6	28.0	1.0000	-5.00
ERNESTINOVO 400/115	424.64	121.48	166.8	29.6	1.0000	419.78	119.06	160.2	-1.4	1.0125	1.25
ĐAKOVO 220/115	236.55	120.27	80.2	-34.6	1.0250	223.69	118.60	82.2	-19.2	0.9875	-3.75
KONJSKO 220/115	237.57	112.20	87.2	-7.4	1.1000	227.17	115.42	90.2	52.0	1.0250	-7.50
MEĐURIĆ 220/115	228.65	115.97	23.4	-12.8	1.0375	222.12	117.65	24.1	-1.0	0.9875	-5.00
MELINA 220/115	232.54	118.05	17.6	1.3	1.0250	227.82	117.04	14.7	-13.8	1.0125	-1.25
MRACLIN 220/115	227.24	113.34	63.2	-27.4	1.0500	224.26	117.96	70.8	15.6	1.0000	-5.00
PEHLJIN 220/115	231.89	116.39	37.9	7.4	1.0500	227.20	116.58	40.0	35.2	1.0125	-3.75
ŽERJAVINEC 400/231	405.78	225.25	65.8	-37.1	1.0500	415.10	225.28	66.6	27.5	1.0625	1.25
ŽERJAVINEC 400/115	405.78	113.05	127.6	83.5	1.0375	415.10	118.19	133.4	60.6	1.0000	-3.75

[3] J. PESCHON, D. S. PIERCY, W. F. TINNEY, O. J. TVEIT, M. CUENOD, "Optimum control of reactive power flow", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-87, No. 1, January 1968, pp. 40-48.

[4] O. ALSAC, W. F. TINNEY, B. STOTT, "Sparsity-oriented compensation methods for modified network solutions", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 5, May 1983, pp. 1050-1060.

**Tablica 5. Usporedba stanja sustava i gubitaka za dva pogonska stanja korištena u proračunu**

	Ukupno opterećenje sustava	Gubici prije optimizacije	Gubici poslije optimizacije					
			Linearno ograničenje			Kvadratno ograničenje		
			$k=1$	$k=10$	$k=100$	$k=1$	$k=10$	$k=100$
	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW
16. 7. 2003., 10:30	1731.04	22.4	18.1	18.4	18.4	19.1	19.9	20.1
21. 1. 2004., 10:30	2032.13	27.2	20.9	21.8	22.6	23	23.8	24.4

- [5] O. ALSAC, J. BRIGHT, M. PRAIS, B. STOTT, "Further developments in LP-based OPF", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 5, no. 3, Aug 1990, pp. 697-711.
- [6] A. M. SASSON, F. VILORIA, F. ABOYTES, "Optimal load flow solution using the Hessian matrix", IEEE Trans. on Power Apparatus and systems, Vol. PAS-92, January/February 1973, pp. 31-41.
- [7] R. R. SHOULTS, D. T. SUN, "Optimal Power flow upon P-Q decomposition", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101., No.2, February 1982, pp. 397-405.
- [8] D. I. SUN, B. ASHLEY, A. HUGHES, W. F. TINNEY, "Optimal power flow by Newton approach", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 10, October 1984, pp. 2864-2875.
- [9] M. BJELOGRLIĆ, M. S. ČALOVIĆ, B. S. BABIĆ, "Application of Newton's optimal power flow in voltage/reactive power control", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, No. 4, November 1990, pp. 1447-1453.
- [10] Y. WU, DEBS A. S, R. E. MARSTEN, "Direct nonlinear predictor-corrector primal-dual interior point algorithm for optimal power flows", 1993 IEEE Power Industry Computer Applications Conference, pp. 138-145.
- [11] G. L. TORRES, V. H. QUINTANA, "An interior-point method for nonlinear optimal power flow using voltage rectangular coordinates", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 4, November 1998, pp. 1211-1218.
- [12] G. A. MARIA, J. A. FINDLAY., "A Newton optimal power flow program for Ontario Hydro EMS", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 2, No. 3, August 1987, pp. 576-584.
- [13] D. I. SUN, T. HU, G. LIN, C. LIN, C. CHEN, "Experiences with implementing optimal power flow for reactive scheduling in the Taiwan power system", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, No. 3, August 1988, pp. 1193-1200.
- [14] K. FRAUENDORFER, H. GLAVITSCH, R. BACHER, "Optimization in planning and operation of electric power systems", Physica-Verlag Heidelberg, 1993.
- [15] S. S. SHARIFF, J. H. TAYLOR, E. F. HILL, B. SCOTT, D. DALEY, "Real-time implementation of optimal reactive power flow", IEEE Power Engineering Review, August 2000, pp. 47-51.
- [16] W. ROSEHART, C. CAÑIZARES, V. H. QUINTANA, "Optimal power flow incorporating voltage collapse constraints", Proc. 1999IEEE-PES Summer Meeting, Edmonton, Alberta, Canada, July 1999.
- [17] C. A. CAÑIZARES, W. ROSEHART, A. BERIZZI, C. BOVO, "Comparison of voltage security constrained optimal power flow techniques", Proc. 2001 IEEE-PES Summer Meeting, Vancouver, BC, Canada, July 2001.
- [18] HRN IEC 60038:1998 – IEC Normirani naponi
- [19] PSS/E OPF MANUAL, A Shaw Group Company, October 2002

### ACTIVE POWER LOSS MINIMISATION BY NEWTON METHOD ON THE CROATIAN ELECTRIC ENERGY SYSTEM (EES)

The paper gives an overview on optimal load flows where minimisation of active power losses is stressed. The solution to the problem is proposed by the Newton method using non-linear optimisation technique with boundaries. The method described is tested on the model of the Croatian transmission network. For input data real data are used. The results showed proof for load flow optimisation in order to realise economic transmission network control and keeping the voltage level secure in the system.

### DAS HERABSETZERN DER WIRKLEISTUNG SVERLUSTE AUF MINDESTMASS MITTELS METHODE NACH NEWTON AM BEISPIEL DES KROATISCHEN STROMVERSORGUNGSSYSTEMS

Beschrieben wurde das Problem optimaler Kraftflüsse mit Betonung auf Mindestleistungsverluste. Vorgeschlagen wird die Lösung dieser Frage mittels Newton'scher Methode unter Anwendung des nichtlinearen Optimierens mit Begrenzungen. Die beschriebene Methode wurde am Model des Kroatischen Stromversorgungssystems getestet. Als Eigangswerte für die Berechnung sind reele Werte gebraucht worden. Die Ergebnisse haben die Rechtschaffenheit von Kraftflussoptimierung zwecks wirtschaftlicher Betriebsführung des Übertragungsnetzes und der Erhaltung eines sicheren Spannungspegels im System gezeigt.

Naslov pisaca:

**Mr. sc. Tomislav Plavšić, dipl. ing.**  
**mr. sc. Vladimir Grujić, dipl. ing.**  
Hrvatski nezavisni operator sustava  
i tržišta d.o.o.

Ulica grada Vukovara 37,  
10000 Zagreb, Hrvatska

**dr. sc. Igor Kuzle, dipl. ing.**  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
Zavod za visoki napon i energetiku  
Unska 3, 10000 Zagreb, Hrvatska

Uredništvo primilo rukopis:  
2004 – 04 – 23.