

Minimizacija gubitaka u prenosnoj elektroenergetskoj mreži metodom kvadratnog programiranja

Ana Janković

Elektrotehnički fakultet u Beogradu
Elektrotehnički institut Nikola Tesla
Beograd, Srbija
ana.m.jankovic@ieent.org

Miloš Anđelković

Elektrotehnički fakultet u Beogradu
Elektrotehnički institut Nikola Tesla
Beograd, Srbija
milos.andjelkovic@ieent.org

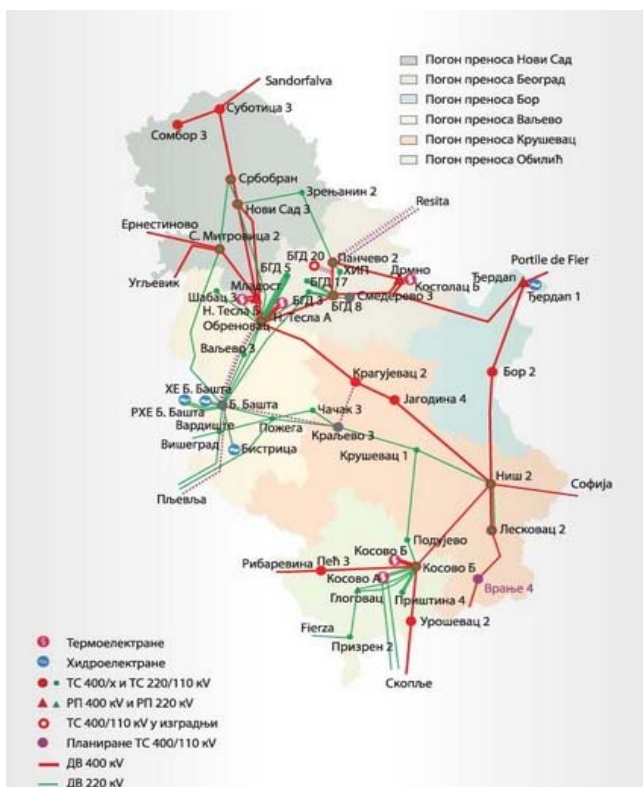
Sažetak—U radu je urađena analiza rada izabrane realne prenosne mreže 110 kV dela Niškog okruga u postojećem stanju sa aspekta zadovoljenja unapred definisanih tehničkih kriterijuma. Predstavljen je detaljan opis mreže počevši od trafostanica 400/X kV, trafostanica 220/110 kV i vodova 220 kV i 110 kV. Cilj rada je minimizacija gubitaka tj. optimizacija kvadratnim programiranjem. Urađena je analiza tokova snaga inicijalnog sistema, kao i tabelarni prikaz rezultata. Proračun je rađen u programu Matlab.

Ključne riječi— prenosna mreža; optimizacija; kvadratno programiranje

I. ANALIZA RADA MREŽE NA PODRUČJU JUGO-ISTOKA

U sastavu Niškog okruga nalaze se pogoni: Elektroistok, Niš, Pirot, Prokuplje, Leskovac i Vranje.

Na slici 1. prikazana je prenosna mreža Republike Srbije.



Slika 1. Prenosna mreža Republike Srbije

Analiza postojećeg stanja prenosne mreže urađena je na osnovu modela za proračun tokova snaga i naponskih prilika koji je uvažio prognozirano potrošnju, parametre elemenata prenosnog sistema i pripadajuće prenosne kapacitete, pretpostavljano uklopno stanje, parametre generatorskih jedinica i modele susednih elektroenergetskih sistema. Takođe su izvršene dodatne analize koje su obradile uticaj proizvodnih kapaciteta na sigurnost prenosne mreže naponskog nivoa 110 kV, analiza sigurnosti transformatorskih stanica 110/X kV u vlasništvu JP EMS, kao i analiza radijalno napajanih transformatorskih stanica 110/X kV u vlasništvu distribucija. U radu će se obrađivati prenosna mreža 110 kV Niškog, Leskovačkog i Vranjanskog okruga.

II. OSNOVNE PRETPOSTAVKE, METODOLOGIJE I KRITERIJUMI

• Opšte postavke

Prenosna mreža se planira uvažavajući sledeće zahteve i principe:

- Omogućiti efikasan i siguran prenos električne energije od elektrana do transformatorskih stanica 110/X kV i potrošača priključenih na prenosni sistem. Zahtev za sigurnim i efikasnim prenosom električne energije mora biti zadovoljen za široki opseg realno očekivanih režima rada EES. Prenosna mreža se planira za režim maksimalne perspektivne potrošnje i druge kritične režime rada koji se određuju na osnovu istorijskih podataka.

- Obezbediti siguran tranzit električne energije između svih EES sa kojima je prenosna mreža posredno ili neposredno povezana, tj. sa kojima radi u interkonekciji, a na osnovu predviđanja razmene električne energije i istorijskih podataka o zagušenjima prilikom proračuna prekograničnih prenosnih kapaciteta i alokacije ovih kapaciteta. Ovo se obezbeđuje prvenstveno planiranjem novih interkonektivnih dalekovoda, u saradnji sa susednim operatorima prenosnih sistema, ali je ponekad ograničenje i unutar prenosnog sistema Republike Srbije, odnosno unutar susednog prenosnog sistema.

- Prenosna mreža naponskih nivoa 400 kV i 220 kV se planira da radi kao zatvorena (petljasta) u svim normalnim pogonskim uslovima rada. U normalnom pogonu prenosna mreža naponskog nivoa 110 kV se planira da radi kao

zatvorena ili kao radijalna (otvorena), u skladu sa važećim uputstvima za pogon prenosnih objekata i kriterijumima koji se koriste prilikom izrade ovih uputstava. Razlozi za radijalan rad mreže 110 kV mogu biti kruženje energije, povećani gubici, izbegavanje paralelnog rada dela mreže 110 kV sa delom mreže višeg naponskog nivoa, itd.

• Planiranje prenosne mreže mora se usaglasiti sa planiranjem distributivnih mreža. Kod radijalno napajanih objekata se ne koristi „N-1“ kriterijum sigurnosti. Potreba za pojačanjem distributivne ili prenosne mreže se određuje na osnovu pouzdanosti isporuke električne energije ovom objektu iz prenosne mreže i mogućnostima za napajanje iz susednih distributivnih objekata [7].

• *Tehnički kriterijumi i ograničenja u radu elektroenergetskog sistema*

Prilikom planiranja razvoja prenosne mreže neophodno je voditi računa o tome da u radu elektroenergetskog sistema moraju biti zadovoljeni određeni tehnički kriterijumi i ograničenja:

- kriterijum sigurnosti „N-1“;
- naponska ograničenja;
- kriterijum dozvoljenog opterećenja elemenata prenosne mreže;
- ograničenja uslovljena vrednostima struja kratkog spoja;
- kriterijum stabilnosti rada EES.

• *Naponska ograničenja*

Na slici 2. predstavljena su maksimalna dozvoljena odstupanja napona za svaki naponski nivo.

Напонски ниво [kV]	Дозвољени опсег вредности напона [kV]
400	380–420
220	200–240
110	99–121

Slika 2. Naponska ograničenja

• *Kriterijum dozvoljenog opterećenja elemenata prenosne mreže*

Nijedan element prenosnog sistema u osnovnom stanju (normalnom pogonu) ili u slučaju nerasplošivosti jednog, bilo kog, elementa prenosne mreže u odnosu na osnovno stanje ne sme biti opterećen iznad dozvoljene termičke granice. Za transformatore maksimalno dozvoljena termička granica je određena njihovom prividnom snagom, odnosno odgovarajućom vrednošću struje za nominalnu vrednost napona na njegovim krajevima. Na slici 3. date su vrednosti za maksimalne dozvoljene struje dalekovoda, a na slici 4. maksimalne dozvoljene struje kablovskih vodova.

Navedeni strujni opsezi za jedan isti presek faznih provodnika su posledica ograničenja koje nameću deonice dalekovoda sa posebnim karakteristikama (na primer prelazi preko reka, oštećenja), ali i ograničenja koja nameće ostala oprema (strujni merni transformatori, VF prigušnice i drugo).

Напонски ниво [kV]	Попречни пресек [mm ²]	Максимално дозвољена струја [A]
400	Al/ε – 2x490	1500–1920
220	Al/ε – 490	780–1290
220	Al/ε – 360	780–1290
110	Al/ε – 490	720–1200
110	Al/ε – 360	720–800
110	Al/ε – 240	360–720
110	Al/ε – 150	360–620
110	Al/ε – 120	360
110	Cu – 95	440

Slika 3. Maksimalno dozvoljene struje dalekovoda

Напонски ниво [kV]	Попречни пресек [mm ²]	Максимално дозвољена струја [A]
110	Al – 1000	890
110	Al – 500	580
110	Cu – 300	480

Slika 4. Maksimalno dozvoljene struje kablovskih vodova

• *Kriterijum sigurnosti „N-1“*

Planiranje prenosne mreže se vrši uz uvažavanje „N-1“ kriterijuma sigurnosti. Ovaj kriterijum glasi: „U slučaju nerasplošivosti jednog, bilo kog, elementa prenosne mreže (tj. Svakog elementa prenosne mreže pojedinačno) koji se u osnovnom stanju nalazi u pogonu ne sme doći do prekoračenja dozvoljenih opterećenja elemenata prenosne mreže niti do narušavanja naponskih ograničenja u čvorištima iste.“ „N-1“ kriterijum sigurnosti mora biti zadovoljen za slučaj nerasplošivosti vodova i transformatora ali ne i sabirnica. Zadovoljenost „N-1“ kriterijuma sigurnosti se ne ispituje za radijalne vodove.

Ako se prilikom ispitivanja zadovoljenosti „N-1“ kriterijuma sigurnosti pokaže da ovaj kriterijum u nekim slučajevima ne može biti zadovoljen promenom uklopne šeme prenosne mreže, planira se izgradnja novog elementa prenosne mreže.

• *Pouzdanost isporuke električne energije*

Kod radijalno napajanih transformatorskih stanica ne može se primeniti „N-1“ kriterijum sigurnosti, već se o razvoju odlučuje na osnovu pouzdanosti napajanja, odnosno kvalitetu pristupa prenosnom sistemu, koji uređuju Pravila o radu prenosnog sistema. U slučaju da se konstatuje da je pouzdanost napajanja ispod propisanih vrednosti, potrebno je razmotriti koje mere je potrebno preduzeti, uključujući i izgradnju novih 110 kV vodova, čime bi se sa radijalnog prešlo na napajanje iz petlje. Međutim, kako se rezervno napajanje ovakvih objekata može obezbediti i iz distributivnog sistema, potrebno je u saradnji operatora prenosnog i distributivnog sistema odlučiti o ekonomski optimalnoj varijanti.

• *Kriterijumi uvođenja novih elemenata prenosne mreže*

Izbor novih elemenata prenosne mreže se vrši kombinacijom tehničkih i ekonomskih kriterijuma, kao i uvažavanjem trenutnog stanja opreme. Na osnovu analiza postojećeg stanja prenosne mreže određuju se varijantna rešenja, da bi se potom na osnovu ekonomskog poređenja varijanti odredila tehničko – ekonomski optimalna rešenja razvoja prenosnog sistema. Tehničke i sigurnosne kriterijume je moguće zadovoljiti na više načina pa se uzima ono rešenje koje je ekonomski najpovoljnije. Na primer,

narušenje dozvoljenih vrednosti napona u čvorištima ili prekoračenje maksimalno dozvoljenih vrednosti opterećenja elemenata prenosne mreže naponskog nivoa 110 kV može se dugoročno rešavati na dva načina:

1. Izgradnjom novih vodova 110 kV iz već postojećih TS 400(220)/110 kV uz eventualno, ako se za to ukaže potreba, povećanje instalisane snage u ovim transformatorskim stanicama;

2. Otvaranjem nove TS 400(220)/110 kV na pogodnom mestu i njenim adekvatnim uklapanjem u postojeću mrežu 110 kV.

Kada se u oba slučaja dobijaju zadovoljavajuća tehnička rešenja, odluka se donosi ekonomskim poređenjem varijanti [3], [6], [7].

III. METODA KVADRATNOG PROGRAMIRANJA

Ima dosta kritičnih funkcija koje se mogu svesti na kvadratnu formu (kao na primer gubici snage). Opšta forma zadatka je:

$$\min_{\vec{x}} \bar{C}^T \vec{x} + \bar{d}^T \vec{x}, \text{ pod ograničenjem: } [A] \vec{x} \leq, =, \geq \bar{b} \text{ uz } \vec{x} > 0 \quad (1)$$

$[D]_{n \times n}$ – matrica koja bez gubitaka opštosti se pretpostavlja da je simetrična, a i ako nije svede se na simetričnu

$[A]_{m \times n}$ – ograničenja

\vec{x} – n dimenzioni vektor, promenljive

\bar{c} – n dimenzioni vektor, troškovi

\bar{b} – m dimenzioni vektor, minimalni uslovi koji moraju biti ispunjeni

n – broj promenljivih

m – broj ograničenja

Da bi se primenila metoda kvadratnog programiranja, ograničenja se moraju linearizovati. To je moguće Kuhn – Tucker metodom. Problem dovoljnosti uslova kod kvadratnog programiranja se svodi na zakon konveksnosti kvadratne forme. Konveksnost je zadovoljena samo ako je kvadratna forma pozitivno definitna.

$$\text{OF: } \min \bar{C}^T \vec{x}$$

$$\text{p.o.: } [A] \vec{x} \geq \bar{b}; \quad \vec{x} \geq \vec{0}$$

$$[A] - m \times n \text{ dimenziona matrica}$$

Da bi se ilustrovali K-T uslovi optimizacije definišu se

$$\vec{W} = \begin{bmatrix} W_1 \\ \vdots \\ W_m \end{bmatrix} \text{ i } \vec{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}$$

Smisao W i v je uvođenje Lagranžovih multiplikatora. Ili dualnih promenljivih. Trebalo bi odmah uočiti da za sva neaktivna ograničenja ove dualne promenljive W i v moraju biti jednake 0. Sa ovako definisanim KT uslovima

optimizacije definišu se sledeći zahtevi koji moraju da budu zadovoljeni u tački $(\vec{x}, \vec{W}, \vec{v})$.

1. $[A] \cdot \vec{x} \geq \bar{b}; \quad \vec{x} \geq 0$
2. $\vec{W}^T \cdot [A] + \vec{v} = \bar{c}; \quad \vec{W} \geq 0; \quad \vec{v} \geq 0$
3. $\vec{W}^T \cdot \{[A] \cdot \vec{x} - \bar{b}\} = 0; \quad \vec{v}^T \cdot \vec{x} \geq 0$

Uslov 1. kaže da svi kandidati za optimalnu tačku moraju biti dopustivi. Moraju da zadovolje ograničenja. Ovaj uslov se zove primalna izvodljivost.

Drugi uslov je uslov fizibiliteta duala. On govori da li su zadovoljeni uslovi koji su nametnuti na dual. Promenljive W i v se zovu Lagranžovi multiplikatori. Lagranžov multiplikator W odgovara ograničenjima $[A] \cdot x \geq b$ a v je u korespondenciji sa ograničenjem $x \geq 0$.

Treći uslov je uslov komplementarnosti. Ili je u tački optimuma b = 0 ili je x = 0, pa je b > 0. Slično važi i za prvi deo uslova 3.

Na prvom koraku formira se Lagranžova funkcija:

$$L(\vec{x}, \vec{\lambda}) = \vec{x}^T [D] \vec{x} + \vec{c}^T \vec{x} + \vec{\lambda}^T \{[A] \vec{x} - \bar{b}\} \quad (2)$$

$\vec{\lambda}$ – m dimenzioni faktor

Lagranžovi multiplikatori:

$$\nabla_{\vec{x}} L(\vec{x}, \vec{\lambda}) = 2[D] \vec{x} + \vec{c} + \vec{\lambda}^T [A] \geq 0 \quad (3)$$

Ova nejednakost se svodi na jednakost uvođenjem dopunskog vektora \vec{v}^* (n dimenzioni faktor):

$$2[D] \vec{x} + \vec{c} + [A]^T \vec{\lambda} - \vec{v}^* = 0 \quad (4)$$

Pa se primenom Kuhn – Tacker'ovog drugog uslova dobija:

$$\nabla_{\vec{x}} L(\vec{x}, \vec{\lambda})^T \vec{x} = 0 \quad (5)$$

Kombinovanjem prethodne dve jednačine dobija se:

$\vec{v}^* \cdot \vec{x} = 0$ – Prvi nelinearni uslov koji mora biti zadovoljen u tački ekstremuma

$$\nabla_{\vec{x}} L(\vec{x}, \vec{\lambda}) = [A] \vec{x} - \bar{b} \leq, =, \geq 0 \quad (6)$$

Svodi se na jednakost uvođenjem \vec{x}_s^* m dimenzionog faktora

$$[A] \vec{x} - \bar{b} + \vec{x}_s^* = 0 \quad (7)$$

$$\nabla L(\vec{x}, \vec{\lambda})^T \vec{x} = 0 \text{ ili } \vec{\lambda}_i^* \vec{x}_{s+i}^* = 0 \quad (8)$$

Ako se pogledaju linearni uslovi vidi se da se zadatak kvadratnog programiranja svodi na linearno programiranje.

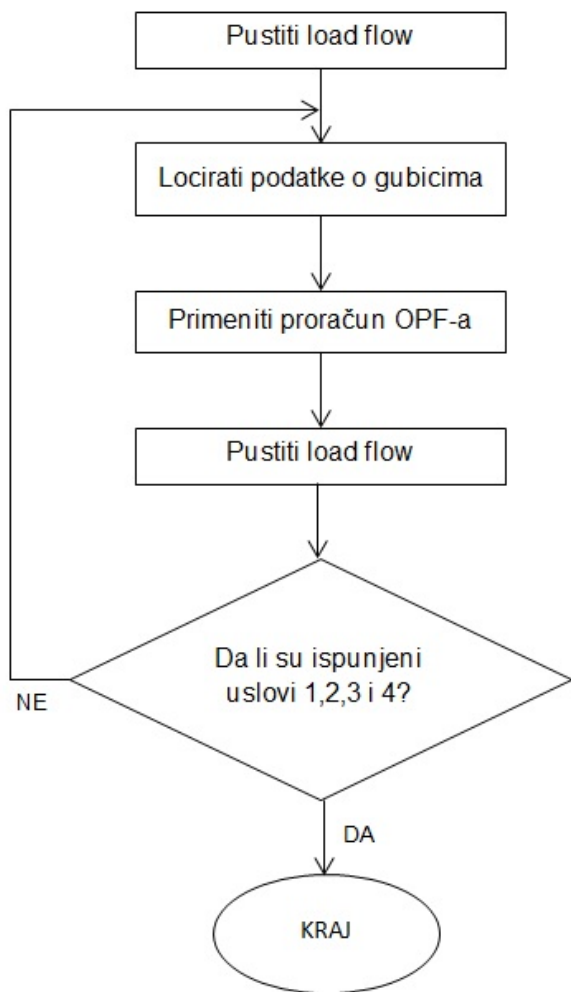
Na slici 5 prikazan je korišćeni algoritam za minimizaciju gubitaka u prenosnoj mreži. Uslovi spomenuti u algoritmu su:

$$1. \quad U_{\min} \leq U \leq U_{\max}$$

$$2. \quad P_{g\min} \leq P \leq P_{g\max}$$

$$3. \quad Q_{g\min} \leq Q \leq Q_{g\max}$$

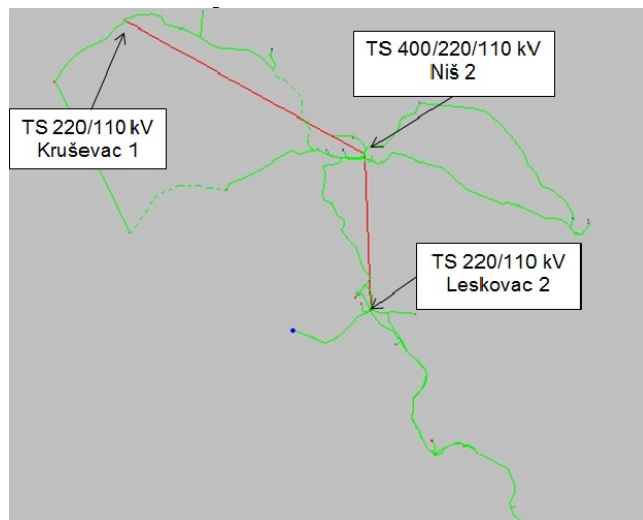
4. Kriterijum dozvoljenog opterećenja elemenata



Slika 5. Algoritam za minimizaciju gubitaka u prenosnoj mreži

IV. REZULTATI PRORAČUNA

Proračuni su rađeni u programu Matlab. Na slici 6. prikazana je prenosna mreža. U tabeli 1. prikazani su gubici pre optimizacije, a tabeli 2. prikazani su gubici posle optimizacije. Gubici u celoj mreži su sa 20.445 MW smanjeni na 19.425 MW, korekcijom napona koja je dobijena kao rezultat metode.



Slika 6. Prenosna mreža

TABELA I. GUBICI U INICIJALNOM SISTEMU

Gubici po elementima (MW)	
Ukupni gubici u mreži	20.445
Gubici na vodovima 110kV	8.239
Gubici na vodovima 220kV	9.082
Gubici u transformatorima	3.124

TABELA II. GUBICI POSLE OPTIMIZACIJE

Gubici po elementima (MW)	
Ukupni gubici u mreži	19.425
Gubici na vodovima 110kV	7.825
Gubici na vodovima 220kV	8.556
Gubici u transformatorima	3.044

V. ZAKLJUČAK

U radu je prikazano kako se pomoću metode kvadratnog programiranja mogu minimizirati gubici u prenosnoj elektroenergetskoj mreži. Primenom metode kvadratnog programiranja, tokovi po granama u mreži su se znatno promenili. Kao i gubici u mreži. Ta promena je prikazana tabelarno.

Gubici u celoj mreži su sa 20.445 MW smanjeni na 19.425 MW.

Ova metoda je korisna zbog više razloga:

- Pouzdanost zbog primene u realnim EES
- Brzina
- Fleksibilnost
- Prihvatljivost za širok krug korisnika

Najčešći zadatak je minimizacija troškova proizvodnje aktivne snage (troškovi uglja u TE) koji se najlakše modeluju kao kvadratne krive. Zatim minimizacija gubitaka aktivne snage. Treći tip zadatka je minimizacija broja kontrolnih akcija u cilju upravljanja.

LITERATURA

- [1] Distributivne i industrijske mreže-Nikola Rajaković, Dragan Tasić B.
- [2] Analiza elektroenergetskog sistema- Nikola Rajaković
- [3] Pravila o radu prenosnog sistema EMS, verzija 2.0, jun 2014. godine
- [4] Electric power systems applications of Optimization – James A. Momoh
- [5] Stephen Boyd, Lieven Vandenberghe - Convex Optimization
- [6] Metodologija i kriterijumi za planiranje razvoja prenosne mreže EPS
- [7] Pravila o radu prenosnog sistema
- [8] James A. Momoh, S.X. Guo, E.C. Ogbuobiri, R. Adapa, „The quadratic interior point method solving power system optimiyation problems”, IEEE, 1993.

ABSTRACT

This paper presents analysis of the selected real transmission 110kV network Niš in its present condition from the aspect of pre-defined technical criteria. A detailed description of the network starting from substations 400 / X kV, substations 220/110 kV and feeders 220 kV and 110 kV is given. The aim of the paper is to minimize the losses with optimization method of quadratic programming. Power flow analysis of the initial system is done, and the tables with results is given. Calculation was made in the program Matlab.

MINIMIZATION OF LOSSES IN POWER TRANSMISSION NETWORK WITH METHOD OF QUADRATIC PROGRAMMING

Ana Janković
Miloš Anđelković