

**PRIMENE DC MODELA TOKOVA SNAGA U PLANIRANJU I EKSPLOATACIJI
ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA****APPLICATIONS OF DC LOAD FLOW MODEL IN PLANNING AND OPERATIONS OF
POWER SYSTEMS**Goran Mitrović, Neven Kovački, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – Cilj ovog rada je da prikaže model jednosmernih (DC) tokova snaga, kao i neke od najčešćih primena ovog modela u planiranju i eksploataciji elektroenergetskih sistema (EES). Najpre je prikazan DC model tokova snaga, kao i njegovo izvođenje iz klasičnog modela tokova snaga. Zatim su prikazane primene ovog modela u proračunu faktora osetljivosti prenosnih snaga, analizi sigurnosti, problemu optimalnog odsecanja opterećenja i problemu optimalne preraspodele generatorske proizvodnje. Navedene primene DC modela tokova snaga demonstrirane su na primeru realne prenosne mreže, a rezultati su prikazani i komentarisani u radu.

Ključne reči: jednosmerni (DC) model tokova snaga, faktori osetljivosti prenosnih snaga, analiza sigurnosti, optimalno odsecanje potrošnje, preraspodela generatorske proizvodnje

Abstract – The aim of this paper is to present direct current (DC) load flow model and some of the most common applications of this model in planning and operations of power systems. First, derivation of DC load flow model is presented, based on classical load flow model. Then, the paper presents applications of this model in the calculation of power transfer distribution factors, power system contingency analysis, load shedding and re-scheduling of generation powers. All the presented applications of DC load flow model are demonstrated on the example of real transmission network and the results are presented and discussed in the paper.

Keywords: direct current (DC) load flow model, power transfer distribution factors, contingency analysis, load shedding, generation re-scheduling

1. UVOD

Većina algoritama za proračun tokova snaga u prenosnim mrežama zasnovana je na nelinearnim matematičkim modelima i iterativnom postupku rešavanja (npr. Newton–Raphson-ov iterativni postupak) [1]. Uprkos visokoj tačnosti ovih proračuna, u različitim analizama koje se sprovode u okviru planiranja i eksploatacije EES-a (npr. analiza sigurnosti) potrebno je uraditi veliki broj ovih proračuna, što zahteva značajno računarsko vreme i veliko zauzeće memorije računara [2]. Pored toga, u procesima planiranja i eksploatacije EES-a često se rešavaju različiti optimizacioni problemi.

NAPOMENA:

Ovaj članak proistekao je iz master rada čiji mentor je bio docent dr Neven Kovački.

Ukoliko bi se oni zasnivali na klasičnom (nelinearnom) modelu tokova snaga, dobijeni optimizacioni modeli bi bili bazirani na nelinearnom programiranju i njihovo rešavanje bi bilo veoma složeno. Iz navedenih razloga, u mnogim proračunima u planiranju i eksploataciji EES-a umesto klasičnog modela tokova snaga koriste se razni približni, najčešće raspregnuti modeli tokova snaga, među kojima posebno mesto zauzima linearni model jednosmernih (DC) tokova snaga.

Cilj ovog rada jeste da prikaže neke od najčešćih primena DC modela tokova snaga u planiranju i eksploataciji EES-a. U ovom radu obrađene su primene DC modela tokova snaga u proračunima faktora osetljivosti prenosnih snaga, analizi sigurnosti, kao i u rešavanju problema minimalnog odsecanja opterećenja i problema preraspodele generatorske proizvodnje.

2. DC MODEL TOKOVA SNAGA

U ovoj glavi je prikazano izvođenje DC modela tokova snaga [2]. Polazi se od opšteg izraza za bilans aktivnih snaga u čvorovima EES-a iz klasičnog modela tokova snaga:

$$P_i = P_{gi} - P_{pi} = G_{ii}V_i^2 + V_i \sum_{j \in \alpha_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}), \quad (1)$$
$$i = 1, \dots, N,$$

gde su sa P_{gi} i P_{pi} označene proizvodnja i potrošnja aktivne snage u čvoru (i), sa G_{ij} i B_{ij} su označeni realni i imaginarni delovi elemenata matrice admitansi $\underline{Y}_{bus} = \{Y_{ij}\} = \{G_{ij} + jB_{ij}\}$ na poziciji “ ij ”, dok N predstavlja broj čvorova u EES-u. Ako se u izrazima za proračun matrice admitansi \underline{Y}_{bus} zanemare sve otočne admitanse i uvedu sledeće pretpostavke:

1. $G_{ij} \approx 0$;
2. $V_i \approx V_j \approx 1.00$ [r. j.],
3. $a_{ij} = 1$ (a_{ij} je odnos transformacije realnih transformatora),
4. $\cos \theta_{ij} \approx 1.00$; $\sin \theta_{ij} \approx \theta_{ij}$,

jednačina (1) postaje:

$$P_i = \sum_{j \in \alpha_i} B_{ij} \theta_{ij} = -B_{ii} \theta_i - \sum_{j \in \alpha_i} B_{ij} \theta_j, \quad (2)$$
$$i = 1, 2, \dots, N,$$

pri čemu je:

$$B_{ii} = - \sum_{j \in \alpha_i} B_{ij} = \sum_{j \in \alpha_i} B_{ij}^g; B_{ij}^g = - \frac{1}{X_{ij}^g}, \quad (3)$$

gde je B_{ij}^g susceptansa, a X_{ij}^g reaktansa grane ($i-j$).

U matricnoj formi jednačina (2) postaje:

$$\mathbf{P} = -\mathbf{B}'\boldsymbol{\theta}, \quad (4)$$

gde je matrica \mathbf{B}' ($N \times N$)-dimenziona matrica susceptansi nezavisnih čvorova mreže, \mathbf{P} je N -dimenzioni vektor aktivnih injektiranja, a $\boldsymbol{\theta}$ je N -dimenzioni vektor faznih stavova fazora napona u nezavisnim čvorovima.

Matrica \mathbf{B}' u jednačini injektiranja (4) je singularna matrica. Međutim, ukoliko se unapred izabere fazni stav jednog čvora (na primer, $i = 1, \theta_1 = 0$), tada se sistem jednačina (4) svodi na $(N-1)$ -dimenzioni sistem jednačina:

$$\mathbf{P}_r = -\mathbf{B}'_r\boldsymbol{\theta}_r, \quad (5)$$

gde je \mathbf{B}'_r nesingularna, kvadratna, redukovana matrica susceptansi, reda $(N-1)$ dobijena odstranjivanjem vrste i kolone iz matrice \mathbf{B}' koje odgovaraju referentnom čvoru (ovde $i = 1$), dok \mathbf{P}_r i $\boldsymbol{\theta}_r$ predstavljaju redom redukovani vektor aktivnih injektiranja i vektor nepoznatih faznih uglova u nezavisnim čvorovima, dimenzija $(N-1)$.

Linearni model jednosmernih (DC) tokova snaga (4) daje izraz za fazne uglove napona u PQ i PV čvorovima, tj. u svim čvorovima izuzev referentnog čvora ($i = 1$), proračunom vektora:

$$\boldsymbol{\theta}_r = -[\mathbf{B}'_r]^{-1}\mathbf{P}_r; \boldsymbol{\theta} = [0 \ \boldsymbol{\theta}_r]^T. \quad (6)$$

Tokovi snaga po granama EES-a se prema DC modelu tokova snaga računaju na sledeći način:

$$P_{ij} = b_{ij}(\theta_i - \theta_j) = -b_{ij}^g(\theta_i - \theta_j) = \frac{\theta_i - \theta_j}{X_{ij}^g} [\text{r.j.}], i, j = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

gde je b_{ij} odgovarajući element redukovane matrice susceptansi \mathbf{B}'_r .

3. PRORAČUN FAKTORA OSETLJIVOSTI PRENOSNIH SNAGA

Faktori osetljivosti prenosnih snaga (*eng. power transfer distribution factors – PTDFs*) definišu se kao odnos malog priraštaja toka aktivne prenosne snage po nekoj grani (l) i priraštaja veličine neke od promenljivih, ili parametara od kojih snaga zavisi (npr. moduli napona (V_i), fazni uglovi napona (θ_i), tokovi snaga po granama itd. Ovi faktori se vrlo efikasno proračunavaju upravo primenom DC modela tokova snaga. Osnovni PTDF faktori osetljivosti su faktori preraspodele za ispade generatora i distribicioni faktori za ispade grana [2].

3.1. Određivanje faktora preraspodele pri ispadu generatora

Ovi faktori definišu se kao:

$$a_l^i = \frac{\Delta P_l}{\Delta P_i} = \frac{1}{X_{ij}^g} \left(\frac{\Delta \theta_M}{\Delta P_i} - \frac{\Delta \theta_K}{\Delta P_i} \right), \quad (8)$$

gde je ΔP_l mala promena toka aktivne snage u grani (l), ΔP_i mala promena aktivnog injektiranja u čvoru (i), a sa $\Delta \theta_M$ i $\Delta \theta_K$ označene su promene faznih stavova fazora napona u čvorovima koje povezuje grana (l).

Pozitivne vrednosti a_l^i pokazuju da porast snage injektiranja u čvoru i izaziva porast toka snage u grani (l), dok smanjenje snage u istom čvoru ima suprotan efekat.

3.2. Određivanje distribucionih faktora pri ispadu grana

Ovi faktori definišu se kao:

$$d_l^k = \frac{\Delta P_l}{P_k^0} = \frac{P_l - P_l^0}{P_k^0}, k, l = 1, 2, \dots, L; l \neq k. \quad (9)$$

gde je P_l^0 tok aktivne snage po grani (l) pre ispada grane (k), a P_k^0 je tok aktivne snage po grani (k) pre ispada.

4. ANALIZA SIGURNOSTI EES

Cilj analize sigurnosti EES-a je da se proceni da li je došlo do narušavanja pogonskih ograničenja posle pojave poremećaja u sistemu [2]. Problem analize velikog broja mogućih poremećaja u nekom EES-u zahteva da se svi proračuni sprovedu u što kraćem mogućem roku, čime se omogućuje da, ako je sigurnost sistema ugrožena, operatori preduzmu odgovarajuće akcije. Jedan od postupaka koji omogućava ove brze proračune, u prvom redu one čiji je cilj otkrivanje pojava preopterećenja, jeste proračun faktora osetljivosti prenosnih snaga koji su objašnjeni u prethodnom delu. Pomoću njih, moguće je proračunati nove vrednosti tokova snaga preko sledećih izraza:

$$P_l' = P_l^0 + \Delta P_l = P_l^0 + a_l^i \Delta P_i, l = 1, 2, \dots, L, \quad (10)$$

$$P_l' = P_l^0 + \Delta P_l = P_l^0 + d_l^k P_k^0, l = 1, 2, \dots, L. \quad (11)$$

Proračunatim vrednostima tokova aktivnih snaga na osnovu DC modela tokova snaga može se na brz način proveriti da li u sistemu postoji preopterećenje. Naime, tok snage po svakoj grani može se dalje uporediti sa graničnom snagom te grane, i ako je ta granica prevaziđena, daje se upozorenje operatoru da preduzme akcije kojima će se tokovi snaga vratiti u dozvoljene granice. U tu svrhu najčešće se sprovodi odsecanje dela opterećenja i preraspodela generatorske proizvodnje, koji su opisani u sledećim glavama.

5. PROBLEM MINIMALNOG ODSECANJA OPTEREĆENJA

Problem minimalnog odsecanja opterećenja predstavlja optimizacioni problem kojim se određuje minimalno opterećenje koje je potrebno odseći kako bi bila zadovoljena pogonska ograničenja u EES-u [3]. Ovaj problem je značajan jer se njegovim rešavanjem dobija uvid u promene snaga potrošnji nakon nekog poremećaja u mreži, tj. nakon ispada nekog od generatora ili grane. Pogonska ograničenja EES-a odnose se na proizvodne mogućnosti generatora u pogledu aktivnih snaga, na prenosne sposobnosti svih grana prenosne mreže izraženih preko tokova aktivnih snaga, kao i na maksimalno dozvoljene vrednosti odsecanja potrošnje u čvorovima sistema. Primenom DC modela tokova snaga navedeni problem moguće je formulisati u domenu linearnog programiranja na sledeći način:

$$\min \left\{ z = \sum_{i=1}^N R_i \right\}, \quad (12)$$

gde je R_i odsečena (neisporučena) aktivna potrošnja u čvoru (i). Jednačina (13) predstavlja optimizacioni kriterijum problema minimalnog odsecanja opterećenja i njome se izražava minimizacija zbira odsečenih (neisporučenih) potrošnji u sistemu.

U datom optimizacionom modelu važe sledeća ograničenja:

1. Ograničenje bilansa snaga u svim čvorovima mreže osim referentnog, $i = 2, 3, \dots, N$:

$$-\sum_{j \in \alpha_i} B_{ij} \theta_{ij} + P_{gi} + R_i = P_{pi}, \quad (13)$$

2. Ograničenje ukupnog bilansa snaga u EES-u:

$$\sum_{i=1}^N P_{gi} + \sum_{i=1}^N R_i = \sum_{i=1}^N P_{pi}. \quad (14)$$

3. Ograničenje opsega proizvodnih jedinica u svim čvorovima, $i = 1, 2, \dots, N$:

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{max}, \quad (15)$$

gde su sa P_{gi}^{min} i P_{gi}^{max} , predstavljene donja i gornja granica proizvodnje aktivne snage u čvoru (i), respektivno.

4. Ograničenje potrošnje u svim čvorovima, $i = 1, 2, \dots, N$:

$$0 \leq R_i \leq P_{pi}. \quad (16)$$

5. Ograničenje maksimalne prenosne sposobnosti svih grana sistema, $l = 1, 2, \dots, L$:

$$-\bar{P}_l \leq b_{ij} \cdot (\theta_i - \theta_j) \leq \bar{P}_l \quad (17)$$

gde je sa \bar{P}_l predstavljena maksimalna dozvoljena vrednost toka aktivne snage po grani (l).

6. PROBLEM PRERASPODELE GENERATORSKE PROIZVODNJE

Problem preraspodele generatorske proizvodnje predstavlja optimizacioni problem kojim se određuje režim u kojem je zbir troškova promene aktivnih generatorskih proizvodnji u svim čvorovima minimalan, pri čemu su zadovoljena sva pogonska ograničenja [3]. Ovaj problem je značajan jer se njegovim rešavanjem dobija uvid u preraspodelu generatorskih proizvodnji nakon nekog poremećaja. Primenom DC modela tokova snaga navedeni problem moguće je formulisati u domenu linearnog programiranja na sledeći način:

$$\min \left\{ z = \sum_{i=1}^N c_i(P_{gi}^0) \cdot \Delta P_{gi} \right\}, \quad (18)$$

gde su sa $c_i(P_{gi}^0)$ označeni proizvodni troškovi pri promeni generatorske proizvodnje u tački linearizacije definisanoj preko vrednosti bazne proizvodnje P_{gi}^0 , u [N.J./r.j. MW], a sa ΔP_{gi} predstavljena je promena proizvodnje aktivne snage u čvoru (i) u odnosu na baznu vrednost P_{gi}^0 . U ovom optimizacionom modelu važe sledeća ograničenja:

1. Bilansna jednačina aktivnih snaga u sistemu:

$$\sum_{i=1}^N \Delta P_{gi} = 0, \quad (19)$$

2. Ograničenje promene aktivnih generatorskih aktivnih snaga $i = 1, 2, \dots, N$:

$$P_{gi}^{min} - P_{gi}^0 \leq \Delta P_{gi} \leq P_{gi}^{max} - P_{gi}^0, \quad (20)$$

3. Ograničenje promene tokova aktivnih snaga po granama sistema, $l = 1, 2, \dots, L$:

$$-\bar{P}_l - P_l^0 \leq \sum_{n=2}^N a_l^n \cdot \Delta P_{gn} \leq \bar{P}_l - P_l^0, \quad (21)$$

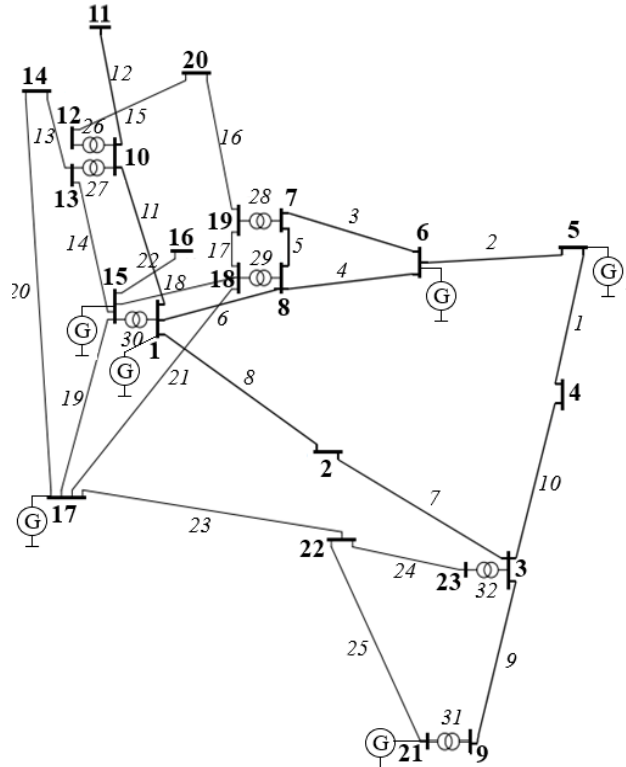
gde je a_l^n je faktor promene toka snage u grani (l) pri jediničnoj promeni aktivne generatorske proizvodnje u čvoru (n).

7. PRIMENE DC MODELA TOKOVA SNAGA

Model DC tokova snaga primenjen je u proračunima analize sigurnosti, faktora osetljivosti, a zatim i u rešavanju optimizacionih problema odsecanja potrošnje i preraspodele generatorske proizvodnje. U ovoj glavi su za svaku primenu prikazani dobijeni rezultati proračuna.

7.1. Opis prenosne test mreže

Svi proračuni vršeni su na uprošćenoj prenosnoj test mreži prikazanoj na slici 1. Ovim sistemom je obuhvaćeno 11 čvorova 400 kV naponskog nivoa i 12 čvorova 220 kV nivoa realnog sistema, dok su svi čvorovi niženaponskih nivoa zanemareni. Podaci o test mreži dati su u [4]. Na slici 1 indeksi čvorova su podebljani (bold), dok su indeksi grana označeni kurzivom (italic).



Slika 1. Prikaz prenosne test mreže [4]

7.2. Proračun DC tokova snaga

Nakon proračuna tokova snaga baziranih na DC modelu, najpribližniji rezultat proračuna dobijen je za granu (1) i pri tome relativna greška iznosi 0.18 %, dok se najveće odstupanje javlja za granu (16) i pri tome relativna greška iznosi 4.96 %.

7.3. Analiza sigurnosti i proračuni faktora osetljivosti

U slučaju analize sigurnosti za ispade generatora, dolazi se do zaključka da se najkritičnije vrednosti u pogledu prekoračenja dozvoljenih tokova snaga dobijaju u slučaju ispada generatora u čvoru (5).

Do najvećeg prekoračenja dolazi u grani (5), gde ono čak za 97.2% premašuje dozvoljenu granicu toka aktivne snage za posmatranu granu. U ovom slučaju, faktor preraspodele toka aktivne snage za granu sa preopterećenjem iznosi $a_5^5 = 0.304$.

Za slučaj ispada grana, najnepovoljniji slučaj dešava se kada dođe do ispada grane (3), pri tome najveće preopterećenje je u grani (5) i u tom slučaju je dozvoljena granica premašena za 97.1 %.

Vrednost distribucionog faktora pri ispadu grane (3) za granu sa preopterećenjem iznosi $d_3^3 = -0.921$.

7.4. Minimalno odsecanje opterećenja

Problem minimalnog odsecanja opterećenja u ovom radu, razmatran je za najkritičniji slučaj ispada grana, tj. za ispad grane (3). Navedeni optimizacioni model je implementiran u programskom jeziku AMPL i rešavan na on-line NEOS serveru [5].

Nakon proračuna, dobija se da opterećenje koje je potrebno odseći iznosi 230.962 MW.

U tabeli 1 prikazani su čvorovi u kojima je došlo do redukcije potrošnje, kao i njihove vrednosti pre i posle razmatranog poremećaja.

7.5. Preraspodela generatorske proizvodnje

Problem optimalne preraspodele generatorske proizvodnje takođe je razmatran za najkritičniji slučaj ispada grane, tj. za ispad grane (3). Navedeni optimizacioni model takođe je implementiran u programskom jeziku AMPL i rešavan na on-line NEOS serveru.

Cene proizvodnih troškova određuju se na sledeći način:

$$c_i = 3.385 \cdot P_{g_i} + 0.007 \cdot P_{g_i}^2, \quad i = 1, \dots, N. \quad (22)$$

Nakon proračuna dobija se da zbir proizvodnih troškova iznosi 28.855 [N.J./MW]

Vrednosti snaga proizvodnje po čvorovima, pre i nakon razmatranog poremećaja, prikazane su u tabeli 2.

8. ZAKLJUČAK

U ovom radu opisan je DC model tokova snaga, a cilj rada je upravo bio da pokaže efikasnost i primene ovog modela u eksploataciji i planiranju EES-a. Na osnovu proračunatih vrednosti tokova aktivnih snaga, u vrlo kratkom roku se može analizirati sigurnost EES-a poređenjem vrednosti tokova snaga sa unapred definisanim granicama maksimalnih tokova snaga u slučaju nekog od poremećaja sa liste specifikovanih kvarova.

Sa druge strane, pomoću proračunatih faktora osetljivosti prenosnih snaga, vrlo brzo se može utvrditi postojanje preopterećenja za slučaj pretpostavljenih ispada svih generatora i grana u sistemu.

Takođe, pokazuje se da je DC model tokova snaga vrlo efikasan i pri rešavanju optimizacionih problema koji postoje u planiranju i eksploataciji EES-a.

Tabela 1. Redukcija potrošnje u čvorovima EES-a

Indeks čvora	Stara vrednost snage potrošnje [MW]	Nova vrednost snage potrošnje [MW]
7	24.00	0.00
18	540.00	376.75
19	167.00	0.00
20	130.50	2.728

Tabela 2. Promena proizvodnje u čvorovima EES-a

Indeks čvora	Stara vrednost snage proizvodnje [MW]	Nova vrednost snage proizvodnje [MW]
1	1184.40	1379.80
5	675.00	264.10
6	349.00	355.32
15	553.00	663.60
17	1111.00	1333.20
21	436.00	312.37

9. LITERATURA

- [1] V. C. Strezoski: *Osnovni proračuni elektroenergetskih sistema. Tom II, Tokovi snaga i kratki spojevi*; FTN Izdavaštvo, Novi Sad, 2017.
- [2] M. S. Čalović, A. T. Sarić, P. Č. Stefanov: *Eksploatacija elektroenergetskih sistema u uslovima slobodnog tržišta*; Srbija: Čačak, Tehnički fakultet, 2005.
- [3] V. Levi, D. Bekut: *Primena računarskih metoda u elektroenergetici*; Stylos art, Novi Sad, 1997.
- [4] N. Rajaković, M. Čalović, P. Stefanov, A. Savić: *100 rešenih zadataka iz analize elektroenergetskih sistema*; Elektrotehnički fakultet Beograd, Beograd, 2002.
- [5] <https://neos-server.org>

Kratka biografija



Goran Mitrović rođen u Novom Sadu, 1996. god. Diplomirao je na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetski sistemi 2019. godine.



Neven Kovački rođen u Zrenjaninu, 1987. god. Diplomirao je, masterirao i doktorirao na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetski sistemi redom 2010, 2011. i 2018. godine.