

PRORAČUN TOKOVA SNAGA SA UVAŽENOM UDALJENOM REGULACIJOM NAPONA**POWER FLOW CALCULATION CONSIDERING REMOTE VOLTAGE REGULATION**Milica Brkušanin, Neven Kovački, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – U ovom radu je predstavljeno proširenje klasičnog modela tokova snaga sa ciljem da se uvaži efekat udaljene regulacije napona. Udaljena regulacija napona podrazumeva da se u svakoj zoni elektroenergetskog sistema definiše po jedan pilot čvor u kome se reguliše napon tako što se menjaju proizvodnje reaktivnih snaga generatora u datoj zoni. Proširenje klasičnog modela tokova snaga se sastoji u uvođenju dva nova tipa čvorova: PQV i P. Predstavljeni model tokova snaga je verifikovan na primeru mreže od 30 čvorova, a rezultati su prikazani i komentarisani u radu.

Ključne reči: Proračun tokova snaga, Udaljena regulacija napona, Pilot čvorovi, Newton-Raphsonova metoda.

Abstract – This paper presents extension of power flow model to consider the effect of remote voltage regulation. Remote voltage regulation is conducted such that in each zone of the power system a pilot bus is defined, in which the voltage is regulated by adjusting the reactive power production on generators in the considered zone. The extension power flow model involves introducing of two new types of nodes: PQV and P. Remote voltage regulation has been verified on test system with 30 buses, and the results are presented and discussed in the paper.

Keywords: Power flow calculation, Remote voltage regulation, pilot buses, Newton-Raphson method.

1. UVOD

Proračun tokova snaga je jedan od najvažnijih proračuna u analizi elektroenergetskih sistema (EES). Rezultati ovog proračuna se široko koriste u planiranju i eksploataciji EES. Bilansne jednačine aktivnih i reaktivnih snaga koje čine klasični model tokova snaga su nelinearne, zbog čega se za njegovo rešavanje najčešće koriste iterativne metode za rešavanje sistema nelinearnih jednačina. U ovom radu se za to primenjuje Newton-Raphson metoda.

S obzirom na veliki značaj ovog proračuna, od velikog značaja je da se u njemu na adekvatan način uvaži efekat regulacije napona u EES. Regulacija napona hijerarhijski se može podeliti na primarnu, sekundarnu i tercijarnu regulaciju. U okviru sekundarne regulacije napona posebno je važno uvažiti efekat udaljene regulacije napona.

NAPOMENA:

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

Udaljena regulacija napona podrazumeva da se u jednom ili više odabranih pilot čvorova (eng. pilot bus) reguliše napon proizvodnjom reaktivne snage u generatorima koji su više ili manje udaljeni od pilot čvorova. Napon pilot čvor postaje konstantan u proračunu tokova snaga, dok je u čvoru koji reguliše pilot čvor (kontrolni generatorski čvor) napon varijabilan. U ovom radu je predstavljeno proširenje klasičnog modela tokova snaga sa ciljem da se uvaži efekat udaljene regulacije napona.

2. KLASIČNI MODEL TOKOVA SNAGA

U ovom poglavlju predstavljen je klasični model tokova snaga. Pri tome je opisana Netwon-Raphsonova metoda za proračun tokova snaga.

Svaki čvor k opisuje se sa šest promenljivih [4]:

- aktivna i reaktivna snaga proizvodnje P_{G_k} i Q_{G_k} ,
- aktivna i reaktivna snaga potrošnje P_{P_k} i Q_{P_k} ,
- modul i fazni stav fazora napona V_k i θ_k .

Injektirana snaga se predstavlja kao [4]:

$$\underline{S}_k = P_k - jQ_k, \quad (2.1)$$

gde je k čvor u elektroenergetskom sistemu, \underline{S}_k injektirana kompleksna snaga, P_k injektirana aktivna, Q_k injektirana reaktivna snaga čvora k .

Aktivna i reaktivna injektirana snaga čvora k se dobija razlikom aktivne, odnosno reaktivne snage proizvodnje i potrošnje [4]:

$$P_k = P_{G_k} - P_{P_k}, \quad (2.2)$$

$$Q_k = Q_{G_k} - Q_{P_k}. \quad (2.3)$$

Injektirana snaga čvora k je jednaka nuli, ako u čvoru nije priključen nijedan generator, ni potrošač.

Čvorovi u elektroenergetskim sistemima mogu se podeliti na: referentno-balansni čvor (tip θV – poznati su V_k i θ_k), potrošačke čvorove (tip PQ – poznati su P_k i Q_k) i generatorske čvorove (tip PV – poznati su P_k i V_k).

Relacija bilansa kompleksnih snaga u čvorovima elektroenergetskog sistema [4]:

$$\underline{S}_k = \underline{V}_k^* \underline{I}_k, \quad (2.4)$$

$$\underline{I}_k = \sum_{i=1}^n \underline{Y}_{ki} \underline{V}_i, \quad (2.5)$$

gde je \underline{V}_k fazor napona u čvoru k, I_k injektirana kompleksna struja čvora k, dok \underline{Y}_{ki} predstavljaju elemente matrice admitansi.

Kombinujući relacije (2.1), (2.4) i (2.5) dobija se:

$$P_k - jQ_k = \underline{V}_k^* \sum_{i=1}^n \underline{Y}_{ki} \underline{V}_i \quad (2.6)$$

Relacije za bilanse aktivnih i reaktivnih snaga u čvorovima elektroenergetskog sistema dobijaju se iz relacije (2.6) [1]:

$$P_k = \operatorname{Re} \left\{ \underline{V}_k^* \sum_{i=1}^n \underline{Y}_{ki} \underline{V}_i \right\}, \quad (2.7)$$

$$Q_k = -\operatorname{Im} \left\{ \underline{V}_k^* \sum_{i=1}^n \underline{Y}_{ki} \underline{V}_i \right\}, \quad (2.8)$$

gde sa leve strane čine injektirane aktivne i reaktivne snage, a desne strane odgovarajuće snage koje iz tih čvorova granama otiču u sistem.

Proračun tokova snaga svodi se na rešavanje sistema nelinearnih jednačina koga čine relacije (2.7) za svaki PQ i PV čvor, i relacije (2.8) za sve PQ čvorove. U svakoj iteraciji Newton-Raphsonove metode rešava se sledeći linearizovani sistem jednačina [5]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(m)} \\ \Delta Q^{(m)} \end{bmatrix} = -J \Delta X^{(m+1)}, \quad (2.9)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(m)} \\ \Delta Q^{(m)} \end{bmatrix} = -J \begin{bmatrix} \Delta \theta^{(m+1)} \\ \Delta V^{(m+1)} \end{bmatrix}, \quad (2.10)$$

$$\Delta P = [\Delta P_{PV} \quad \Delta P_{PQ}]^T, \quad (2.11)$$

$$\Delta Q = [\Delta Q_{PQ}]^T, \quad (2.12)$$

$$\Delta X = [\Delta \theta_{PV} \quad \Delta \theta_{PQ} \quad \Delta V_{PQ}]^T, \quad (2.13)$$

gde je m broj iteracije, ΔP razlika poznate aktivne snage i injektiranih aktivnih snaga u tekućoj iteraciji, ΔQ razlika poznatih reaktivnih snaga i injektiranih reaktivnih snaga u tekućoj iteraciji, J matrica Jakobijana, ΔX – priraštaj nepoznatih varijabli. Iterativni postupak se ponavlja do ispunjenja zadatih kriterijuma konvergencije.

Dimenzije Jakobijana su [5]:

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_3 \\ J_2 & J_4 \end{bmatrix}, \quad (2.14)$$

gde je:

J_1 (n - 1) · (n - 1) matrica, a ulaz predstavlja $\frac{\partial P}{\partial \theta}$,

J_2 (n - 1) · n_{PQ} matrica, a ulaz predstavlja $\frac{\partial P}{\partial V}$,

J_3 n_{PQ} · (n - 1) matrica, a ulaz predstavlja $\frac{\partial Q}{\partial \theta}$,

J_4 n_{PQ} · n_{PQ} matrica, a ulaz predstavlja $\frac{\partial Q}{\partial V}$,

pri tome je n ukupan broj čvorova, n_{PQ} broj PQ čvorova.

3. REGULACIJA NAPONA I REAKTIVNIH SNAGA

Regulacija napona je složen proces koji zahteva pažljivo upravljanje reaktivnom snagom, korišćenje regulacionih resursa i primenu odgovarajućih tehnika. Cilj je održavanje željenih nivoa napona unutar propisanog tolerancijskog opsega kako bi se obezbedilo stabilno i pouzdano snabdevanje električnom energijom.

Prema regulacionim dejstvima hijerarhijska organizacija upravljanja naponima i reaktivnim snagama se deli na primarnu, sekundarnu i tercijalnu.

Sekundarna regulacija napona se postiže tako što se u svakom delu, tj. zoni sistema zadaje po jedan čvor u kome se napon reguliše prema zadatoj vrednosti. Ovi čvorovi se obično nazivaju pilot čvorovi. Pilot čvorovi se obično biraju tako da njihov napon oslikava celokupni naponski profil u određenoj zoni. Pilot čvorovi se u modelu tokova snaga predstavljaju kao PQV čvorovi (P, Q, V je poznato, θ je nepoznato).

Zadati naponi u pilot čvorovima se regulišu injektiranjem reaktivne snage generatora u datoj zoni. Pri tome može se koristiti jedan generator, ili više generatora koji su priključeni u različitim čvorovima. Generatori obično nisu priključeni u samim pilot čvorovima, nego u čvorovima koji su više ili manje udaljeni od pilot čvora i zato se ovaj postupak naziva još i udaljena regulacija napona.

Čvorovi u kojima su priključeni generatori koji se koriste za udaljenu regulaciju napona se u modelu tokova snaga predstavljaju kao P čvorovi (P je poznato, Q, V i θ je nepoznato).

Svakom PQV čvoru se dodeljuje ili jedan P čvor ili više P čvorova. Ako se zadaje više P čvorova, onda govorimo o distribuiranom P čvoru i zadaju se faktori učešća za svaki od P čvorova koji u tome učestvuju.

4. PROŠIRENJE MODELA TOKOVA SNAGA

Klasifikacija čvora se proširuje sa dva nova tipa čvora PQV i P. Čvor koji sadrži generator je po klasičnom modelu tokova snaga čvor tipa PV, dok se u ovoj glavi predstavlja kao čvor P za slučaj regulacije udaljenih pilot čvorova.

Čvor koji je kontrolisan je po klasičnom modelu tokova snaga čvor tipa PQ, takav pilot čvor zbog dodate regulacije napona postaje PQV čvor, pošto je PQV čvoru poznata aktivna snaga, reaktivna snaga i modul napona [3].

Injektirana reaktivna snaga za k-ti čvor se proračunava kao [3]:

$$Q_k = -\operatorname{Im} \left\{ \underline{V}_k^* \sum_{i=1}^n \underline{Y}_{ki} \underline{V}_i \right\} - \sum_{i \in PQV} Q_{ki}^P, \quad (4.1)$$

$$Q_{ki}^P = p\text{Faktor}_{ki} \cdot \Delta DQ_i \quad (4.2)$$

gde je k čvor tipa P, $p\text{Faktor}_{ki}$ faktor učešća za svaki P čvor, ΔDQ_i reaktivna snaga koja se distribuira u P čvor. Suma svakog faktora učešća mora biti jednaka jedinici.

Proračun tokova snaga Newton-Raphsonovom metodom za relaciju (2.9) se proširuje na sledeći način:

$$\Delta P = [\Delta P_{PV} \quad \Delta P_{PQ} \quad \Delta P_P \quad \Delta P_{PQV}]^T, \quad (4.3)$$

$$\Delta Q = [\Delta Q_{PV} \quad \Delta Q_{PQV} \quad \Delta Q_P]^T, \quad (4.4)$$

$$\Delta X = [\Delta \theta_{PV} \quad \Delta \theta_{PQ} \quad \Delta \theta_P \quad \Delta \theta_{PQV} \quad \Delta V_{PQ} \quad \Delta V_P \quad \Delta DQ]^T. \quad (4.5)$$

Dimenzije Jakobijana iz relacije (2.14) su proširene na sledeći način [5]:

J_1 $(n - 1) \cdot (n - 1)$ matrica, a ulaz predstavlja $\frac{\partial P}{\partial \theta}$.

J_2 $(n - 1) \cdot (n_{PQ} + n_P + n_{DQ})$ matrica, a ulaz predstavlja $\frac{\partial P}{\partial V}$ i $\frac{\partial P}{\partial DQ}$.

J_3 $(n_{PQ} + n_P + n_{PQV}) \cdot (n - 1)$ matrica, a ulaz predstavlja $\frac{\partial Q}{\partial \theta}$.

J_4 $(n_{PQ} + n_P + n_{PQV}) \cdot (n_{PQ} + n_P + n_{DQ})$ matrica, a ulaz predstavlja $\frac{\partial Q}{\partial V}$ i $\frac{\partial Q}{\partial DQ}$.

pri tome je n ukupan broj čvorova, n_{PQ} broj PQ čvorova, n_P broj P čvorova, a n_{PQV} je ukupan broj PQV čvorova.

ΔDQ se proračunavaju na sledeći način:

$$\frac{\partial P_i}{\partial DQ_j} = 0, \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial DQ_j} = -pFaktor_{ij}, \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial DQ_i} = 0, \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial DQ_i} = 0, \quad (4.9)$$

gde je:

i – indeks čvora (1, 2...n),

j – indeks čvora (1, 2...n),

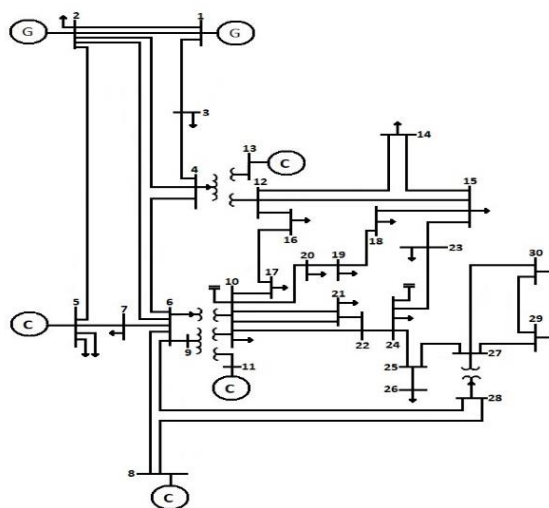
$i \neq j$.

5. VERIFIKACIJA PREDSTAVLJENOG MODELA

Na slici 1. prikazan je model mreže koji se sastoji od 30 čvorova, od kojih su 5 generatorskih čvorova, 24

potrošačka čvora, i 1 referentno-balansni čvor. Model je deo američkog elektroenergetskog sistema, koji je dostupan elektroenergetskoj industriji kao standardni testni slučaj za evaluaciju različitih analitičkih metoda i računarskih programa za rešavanje problema elektroenergetskog sistema. Proračun se vrši nad klasičnim modelom tokova snaga (poglavlje 2), i nad testnim primerima 1, 2 i 3 koji su dobijeni proširenim modelom tokova snaga (poglavlje 4). Razlika između test primera 1 i 2 jeste ispad voda indeksa 2. i 4. kod test primera 2. Test primer 3 ima iste ulazne vrednosti kao test primer 1, osim razlike u vrednostima napona čvora 4 (PQV čvor), gde je postavljen povišen napon.

U tabeli 1. prikazani su najvažniji rezultati proračuna tokova snaga primenom Newton-Raphsonove metode. U cilju potvrde tačnosti proračuna, rezultati za klasičan model tokova snaga su upoređeni sa vrednostima literature iz reference [7]. Ovaj postupak analize rezultirao je zaključkom da su proračunate vrednosti precizno reprodukovane i dosledno usaglašene sa vrednostima navedenim u [7]. Ovaj rezultat pruža potvrdu o tačnosti računskih metoda primenjenih u okviru istraživanja.



Slika 1. Model mreže

Tabela 1. Rezultati proračuna

	Čvor 4		Čvor 2			Grana 2 - 4		Broj iteracija Newton-Raphsonove metode
	tip	V[r.j.]	tip	V[r.j.]	Q_G [MVar]	P[MW]	Q[MVar]	
Klasičan model tokova snaga	PQ	1.01285	PV	1.043	48.8221	45.7118	2.70487	3
Test primer 1	PQV	1.01285	P	1.043	48.8226	45.7119	2.70495	3
Test primer 2	PQV	1.01285	P	1.12513	290.032	/	/	3
Test primer 3	PQV	1.02	P	1.06758	130.486	46.1188	13.3576	3

U test primeru 1, vrednost PQV čvora je postavljena na vrednost dobijenu proračunom klasičnog modela tokova snaga, dok je ulazni podatak za P čvor postavljen na vrednost 1[r.j.]. Analizom klasičnog modela tokova snaga sa test primerom 1, može se primetiti da su rezultati približni. Razlika se pojavljuje zbog zaokruživanja vrednosti modula napona na petu decimalu u test primeru 1, na čvoru 4 (PQV čvoru).

Test primer 2 ima iste ulazne parametre kao test primer 1, sa jedinom razlikom u ispada voda između čvorova 2 i 4, kod test primera 2. Ovo je rezultiralo povećanjem napona na P čvoru, sa njim i povećanje reaktivne snage. U ovom test primeru, zbog ispada voda na čvorovima 2. i 4., došlo je do provere mogućnosti udaljene regulacije generatora za slučaj da ne postoji direktna veza tj. grana između P i PQV čvora. Na slici 1. se može videti da postoji samo jedan vod između čvora indeksa 2. i čvora indeksa 4., a u prikazanim rezultatima se zaključuje da se udaljena regulacija generatora može izvršiti i za ovaj slučaj.

Test primer 3 ima iste ulazne podatke kao test primer 1, sa jedinom razlikom u povećanju napona na čvoru 4 (PQV čvoru). Ovo je rezultiralo povećanjem napona na P čvoru, sa njim i povećanje reaktivne snage, što utiče na naponsko-reaktivnu stabilnost elektroenergetskog sistema

Proveravala se naponska-reaktivna zavisnost na mreži sa generatorskom udaljenom regulacijom napona. Vrednost napona na PQV čvoru se povećavala i smanjivala unutar granica nominalnog napona. Nakon analize rezultata, utvrđeno je da povećanje napona na PQV čvoru rezultira povećanje reaktivne snage generatora u P čvoru, što dalje doprinosi povećanju napona na tom čvoru. S druge strane, kada se moduo napona na PQV čvoru smanjuje, rezultira se smanjenjem reaktivne snage generatora u P čvoru, što dovodi do smanjenja napona na tom čvoru.

Proračun je konvergirao nakon tri iteracije u sva četiri slučaja, nije došlo do povećavanja vremena izvršavanja proračuna u odnosu na klasični model tokova snaga.

6. ZAKLJUČAK

Proverom rezultata Newton-Raphsonovim proračunom za klasični i prošireni model tokova snaga u mreži sa 30 čvorova, dolazi se do zaključka da uvođenje PQV i P čvorova omogućuje uvažavanje udaljene regulacije napona u klasičnom modelu tokova snaga.

Rezultati test primera su pokazali da se PQV i P čvorovi ponašaju sa očekivanim rezultatima tokova snaga i naponskih stanja, tj. kao klasičan model tokova snaga proračun sa PQ i PV čvorom.

Sa povećanjem zadatog modula napona u kontrolisanom PQV čvoru, raste proizvodnja reaktivne snage u odgovarajućem P čvoru, čime se napon u PQV čvoru održava na zadatoj vrednosti.

U radu je korišćena samo jedna metodologija uvažavanja udaljene regulacije napona. U budućim istraživanjima može se analizirati uvažavanje udaljene regulacije napona bez uvođenja novih tipova čvorova.

Proračun Newton-Raphsona metodom bi u tom slučaju pretrpeo promene tako što bi generatorski čvor postao PQ tipa, a udaljeni regulisani čvor PV tipa. Nakon svake iteracije proračuna, reaktivna snaga bi se distribuirala iz PV čvora u PQ čvor uz uvažavanje faktora učešća.

7. LITERATURA

- [1] V. Strezorski, „Analiza elektroenergetskog sistema“, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2011/2012.
- [2] E. Acha, C.R. Fuerte-Esquivel, H. Ambriz-Pérez, C. Angeles-Camacho, „FACTS – Modelling and Simulation in Power Networks“, John Wiley & Sons, LTD, 2004.
- [3] D. Popović, V. Levi, „Extension of load flow model with remote voltage control by generator“, Electric Power Systems Research, Volume 25, Issue 3, 1992.
- [4] M. Čalović, A. Sarić, „Osnovi analize elektroenergetskih mreža i sistema“, Akademska misao, Beograd, 2004.
- [5] N. Qin, „Voltage Control in Future Power Transmission Systems“, PHD thesis, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 2016.
- [6] V. Strezorski, „Osnove elektroenergetike-sistemi, Fakultet tehničkih nauka“, Novi Sad, 1996.
- [7] H. Saadat, „Power System Analysis“, Milwaukee School of Engineering, 1999.
- [8] M. Čalović, A. Sarić, P. Štefanov, „Eksploatacija elektroenergetskih sistema u uslovima slobodnog tržišta“, Tehnički fakultet, Čačak.
- [9] M. Čalović, „Regulacija elektroenergetskih sistema; Tom 2: Regulacija napona i reaktivna snaga“, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 1997.

Kratka biografija



Milica Brkušanić rođena je u Novom Sadu 1992. godine. Diplomski rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva– Elektroenergetski sistemi odbranila je 2016. godine.



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