

MODELOVANJE KORELACIJE MERENJA U ESTIMACIJI STANJA**MODELLING OF MEASUREMENTS CORRELATION IN THE STATE ESTIMATION**Milena Lisov, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – U ovom radu opisan je WLS algoritam estimacije stanja. Na primeru je urađeno modelovanje korelacije merenja sa digitalnih uređaja i pseudo merenja. Na kraju su rezultati modelovanja korelacije merenja analizirani.

Ključne reči: WLS estimacija stanja, korelacija merenja, modelovanje korelacije merenja, digitalni uređaji, pseudo merenja

Abstract – In this paper a WLS algorithm for the state estimation is described. The example is used for modelling of correlation of measurements from digital devices and for modelling correlation of pseudo-measurements. At the end, obtained results are analyzed.

Keywords: WLS state estimation, correlation of measurements, modelling of correlation of measurements, digital devices, pseudo-measurements

1. UVOD

Poznavanje aktuelnog režima elektroenergetskog sistema (EES) je osnova za sve proračune vezane za analizu, upravljanje, eksploataciju, itd. Zbog toga je estimacija stanja osnovna energetska funkcija za najveći broj elektroenergetskih proračuna. Ova funkcija vrši konvertovanje telemetrisanih (aktuelnih) merenja iz realnog vremena i pseudo merenja u pouzdan vektor stanja. Pored toga, funkcija vrši i rekonstrukciju celokupnog režima sistema na osnovu vektora stanja. Kada su promenljive stanja poznate, za datu konfiguraciju i definisane parametre sistema, mogu se jednoznačno proračunati i sve druge systemske promenljive od interesa. Poznavanje stanja EES-a u nekom diskretnom vremenskom trenutku, ali ne i način na koji je sistem dospao u taj režim, estimaciju stanja čini statičkom. Izučavanje statičkih pojava u sistemu podrazumeva upotrebu modela zasnovanih na algebarskim jednačinama. Može se reći da statička estimacija stanja predstavlja on-line proračune vektora promenljivih stanja i ostalih sistemskih promenljivih, na bazi periodičnih merenja iz sistema, sa ciklusom ponavljanja od nekoliko sekundi do nekoliko minuta.

Najčešće korišćeni algoritam u statičkoj estimaciji stanja jeste metod minimuma sume otežanih (ponderisanih) kvadrata reziduala merenja (Weighted Least Squares Method-WLS metod).

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio prof. dr Andrija Sarić, red. prof.

Korelacija merenja predstavlja međusobnu zavisnost dva merenja, bez obzira na vrstu i tip merenja. Ona se modeluje kroz vandijagonalne elemente matrice kovarijansi merenja, pa samim tim uvažavanje korelacije merenja u estimaciji stanja narušava dijagonalnost matrice kovarijansi merenja. Obično se korelacija između merenja sa digitalnih uređaja i između pseudo merenja zanemaruje u cilju optimizacije računarske efikasnosti prilikom proračuna. U ovom radu će na primeru biti istražen uticaj modelovanja korelacije merenja u proračunima statičke estimacije stanja.

2. VARIJANSA MERENJA I TEŽINSKI FAKTOR

Merenjima se pridružuju varijanse, odnosno težinski faktori sa kojima ona ulaze u dalji proračun. Varijansa, tj. težinski faktor merenja se definiše preko matrice kovarijansi merenja \mathbf{R} preko relacije [1]:

$$\mathbf{R} = \text{cov}\{\mathbf{e}\} = E\{\mathbf{e}^T \mathbf{e}\} = \text{diag}\{\sigma_m^2\}, \quad (1)$$

gde je \mathbf{e} vektor grešaka merenja, σ_m^2 je varijansa m -tog merenja, a $m = 1, 2, \dots, M$.

Druga forma prethodne matrice je dijagonalna matrica težinskih faktora \mathbf{W} :

$$\mathbf{W} = \text{diag}\{w_m\} = \mathbf{R}^{-1} = \text{diag}\left\{\frac{1}{\sigma_m^2}\right\}. \quad (2)$$

Treba naglasiti da su matrice \mathbf{R} i \mathbf{W} uvedene kao dijagonalne matrice. To je slučaj samo kada je korelacija između različitih merenja zanemarena. Kada se korelacija merenja ne zanemaruje ove matrice nisu dijagonalne, kao što će to biti slučaj u ovom radu.

3. WLS ALGORITAM

Problem statičke estimacije stanja moguće je definisati kao: pronaći vrednosti promenljivih stanja, pri kojima se ima minimalna suma kvadrata odstupanja između merenih i stvarnih vrednosti veličina (koje su izražene kao funkcija vektora promenljivih stanja \mathbf{x}), pri čemu se svakoj razlici (koja se naziva rezidual merenja) mora dodeliti odgovarajuća težina.

Početna jednačina za algoritam WLS estimacije stanja je [2]:

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ h_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ h_M(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_M \end{bmatrix} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{e}. \quad (3)$$

Vektor \mathbf{z} za M vrednosti merenja je [2]:

$$\mathbf{z}^T = [z_1 \quad z_2 \quad \dots \quad z_M]. \quad (4)$$

Vektor \mathbf{h} sadrži:

$$\mathbf{h}^T = [h_1(\mathbf{x}) \quad h_2(\mathbf{x}) \quad \dots \quad h_M(\mathbf{x})]. \quad (5)$$

Kao što se vidi, vektor \mathbf{h} sadrži M nelinearnih funkcija $h_i(\mathbf{x})$ koje pretpostavljene vrednosti merenja i vezuju za vektor stanja \mathbf{x} koji sadrži n promenljivih:

$$\mathbf{x}^T = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]. \quad (6)$$

Vektor \mathbf{e} predstavlja vektor grešaka merenja koji se sastoji od sledećih elemenata:

$$\mathbf{e}^T = [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_M]. \quad (7)$$

Kriterijumska funkcija se predstavlja sledećom relacijom [2]:

$$J(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^M \frac{(z_i - h_i(\mathbf{x}))^2}{R_{ii}} = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]. \quad (8)$$

Cilj WLS estimatora je minimizacija prethodno date kriterijumske funkcije:

$$\min_{\mathbf{x}} \{J(\mathbf{x}) = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]\}. \quad (9)$$

U ovom radu je za rešavanje optimizacionog kriterijuma korišćen metod normalnih jednačina.

Estimacija vektora promenljivih stanja se dobija iterativnim rešavanjem sledećeg sistema linearizovanih jednačina [2]:

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}^{(k)}) \Delta \mathbf{x}^{(k)} = \mathbf{H}^T(\mathbf{x}^{(k)}) \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}^{(k)})) = \mathbf{H}^T(\mathbf{x}^{(k)}) \mathbf{R}^{-1} \Delta \mathbf{z}^{(k)}, k = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

$$\Delta \mathbf{x}^{(k)} = \mathbf{x}^{(k+1)} - \mathbf{x}^{(k)}, \quad (11)$$

gde je:

$\mathbf{G}(\mathbf{x}^{(k)}) = \mathbf{H}^T(\mathbf{x}^{(k)}) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}(\mathbf{x}^{(k)})$ – matrica pojačanja u k -toj iteraciji;

$\mathbf{H}(\mathbf{x}^{(k)})$ – Jakobijan matrica u k -toj iteraciji;

$\Delta \mathbf{z}^{(k)} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}^{(k)})$ – priraštaj vektora merenja u k -toj iteraciji;

$\Delta \mathbf{x}^{(k)}$ – korekcija vektora promenljivih stanja u k -toj iteraciji.

Iterativni postupak se završava kada je zadovoljena sledeća nejednakost:

$$\max\{\Delta \mathbf{x}^{(k)}\} \leq \varepsilon, \quad (12)$$

gde je ε kriterijum konvergencije.

Kada je skup merenja dovoljan i pravilno distribuiran (observabilan sistem), tada je Jakobijan matrica $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ punog ranga, pa je matrica pojačanja $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ nesingularna matrica, tako da je sigurno obezbeđena numerička stabilnost proračuna. S obzirom da je matrica $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ retka, matrica pojačanja $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ takođe je retka (ali ipak gušća od Jakobijan matrice).

4. MODELOVANJE KORELACIJE MERENJA

Vandijagonalni elementi matrice kovarijansi grešaka merenja definišu se na sledeći način [3]:

$$\sigma_{ij} = \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j, \quad (13)$$

gde su:

σ_{ij} – međusobna varijansa i -tog i j -tog merenja, $i, j = 1, 2, \dots, M$;

ρ_{ij} – faktor korelacije i -tog i j -tog merenja, $i, j = 1, 2, \dots, M$;

σ_i – varijansa i -tog merenja, $i = 1, 2, \dots, M$;

σ_j – varijansa j -tog merenja, $j = 1, 2, \dots, M$;

Vrednost faktora korelacije nezavisno od estimacije stanja može biti u sledećem opsegu:

$$-1 < \rho_{ij} < 1. \quad (14)$$

Ako postoji korelacija između merenja i i j , onda ta korelacija postoji i između merenja j i i . Kada je vrednost faktora korelacije pozitivna, radi se o pozitivnoj korelaciji merenja, u suprotnom korelacija između merenja je negativna.

Matrica kovarijansi grešaka merenja \mathbf{R} sa uključenom korelacijom merenja ima sledeći zapis [4]:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \dots & \rho_{1j} \sigma_1 \sigma_j & \dots & \rho_{1M} \sigma_1 \sigma_M \\ \vdots & \sigma_2^2 & & & \vdots \\ \rho_{i1} \sigma_i \sigma_1 & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ \rho_{M1} \sigma_M \sigma_1 & \dots & \dots & \dots & \sigma_M^2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Merenja sa digitalnih uređaja imaju manju varijansu od pseudo merenja. Ova činjenica se reflektuje većom tačnošću merenja dobijenih sa digitalnih mernih uređaja od istorijskih podataka [4].

Treba napomenuti da situacija kada je $\rho_{ij} = 1.0$ uzrokuje singularnost matrice kovarijansi grešaka merenja \mathbf{R} , odnosno uzrokuje divergenciju estimacije stanja [5]. Zbog toga je vrednost 0.99 odabrana za faktor korelacije potpuno korelisanih merenja.

Gledajući relaciju (15), jasno je da prisustvo korelacije smanjuje retkost matrice kovarijansi grešaka merenja \mathbf{R} , što ima za posledicu smanjenje brzine inverzije matrice pojačanja \mathbf{G} . Zbog toga je bitno razumeti kada je relevantno uključiti korelaciju u proračune radi poboljšanja performansi estimacije, a kada se, sa druge strane, estimacija može održavati dovoljno tačnom bez degradacije brzine procesa estimacije [4].

Radi određivanja uticaja uključivanja korelacije u proračune vrši se proračun korena srednje vrednosti kvadrata grešaka merenja (Root Mean Square Errors - RMSE). Formula za proračun RMSE glasi [4]:

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}}, \quad (16)$$

gde je y_i tačna vrednost veličine, \hat{y}_i estimirana vrednost veličine, a N je broj iteracija prilikom proračuna estimacije stanja. Kako je rečeno u [3] vrednosti promenljivih koje su dobijene proračunom tokova snaga za poznatu konfiguraciju i parametre mreže se smatraju tačnim vrednostima.

4.1 Korelacija merenja sa digitalnih uređaja

U analizi koja je urađena u ovom radu pretpostavlja se da digitalni uređaji koji se nalaze u mreži mere moduo napona i tok aktivne i reaktivne snage na dve različite grane.

Digitalni merni uređaji obično kao izlazne veličine obezbeđuju merenja napona i snage počinjući od direktnih merenja modula napona i struje i razlike faznog ugla napona i struje. Na osnovu ovih merenja indirektno se proračunavaju tokovi aktivnih i reaktivnih snaga [4].

Merenja toka aktivne P i reaktivne snage Q mogu se izraziti kao funkcija modula napona U , modula struje I i razlike faznog ugla napona i struje φ kao:

$$P = P(V, I, \varphi) = VI \cos \varphi, \quad (17)$$

$$Q = Q(V, I, \varphi) = VI \sin \varphi. \quad (18)$$

Grupisanjem jednačina (17) i (18) u vektorsku funkciju dobija se:

$$\mathbf{f}(V, I, \varphi) = \begin{bmatrix} V \\ P(V, I, \varphi) \\ Q(V, I, \varphi) \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Ukoliko se varijanse modula napona, modula struje i faznog ugla obeleže sa $\sigma_V^2, \sigma_I^2, \sigma_\varphi^2$, respektivno, matrica kovarijansi merenja može se izračunati na sledeći način [4]:

$$E[\Delta \mathbf{z}_{vpq} \Delta \mathbf{z}_{vpq}^T] = \begin{bmatrix} \sigma_V^2 & \sigma_{VP} & \sigma_{VQ} \\ \sigma_{PV} & \sigma_P^2 & \sigma_{PQ} \\ \sigma_{QV} & \sigma_{QP} & \sigma_Q^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{z}_{v\varphi i}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sigma_V^2 & & \\ & \sigma_\varphi^2 & \\ & & \sigma_I^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{f}^T}{\partial \mathbf{z}_{v\varphi i}} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

gde su:

$\mathbf{z}_{vpq} = [\mathbf{V} \ \mathbf{P} \ \mathbf{Q}]^T$ – zavisan vektor merenja;

$\mathbf{z}_{v\varphi i} = [\mathbf{V} \ \varphi \ \mathbf{I}]^T$ – nezavisan vektor merenja;

$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{z}_{v\varphi i}^T}$ – Jakobijan vektorske funkcije (19).

Vektorska funkcija \mathbf{f} povezuje nezavisan vektor merenja $\mathbf{z}_{v\varphi i}$ sa zavisnim vektorom merenja \mathbf{z}_{vpq} . Njen Jakobijan

$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{z}_{v\varphi i}^T}$ se zapisuje na sledeći način:

$$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{z}_{v\varphi i}^T} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V}{\partial V} & \frac{\partial V}{\partial \varphi} & \frac{\partial V}{\partial I} \\ \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial \varphi} & \frac{\partial P}{\partial I} \\ \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial \varphi} & \frac{\partial Q}{\partial I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ I \cos \varphi & -VI \sin \varphi & V \cos \varphi \\ I \sin \varphi & VI \cos \varphi & V \sin \varphi \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Uvrštavanjem (21) u jednačinu (20) i njenim proračunom dobijaju se varijanse aktivne i reaktivne snage u sledećem obliku:

$$\sigma_P^2 = \sigma_V^2 I^2 \cos^2 \varphi + \sigma_\varphi^2 V^2 I^2 \sin^2 \varphi + \sigma_I^2 V^2 \cos^2 \varphi, \quad (22)$$

$$\sigma_Q^2 = \sigma_V^2 I^2 \sin^2 \varphi + \sigma_\varphi^2 V^2 I^2 \cos^2 \varphi + \sigma_I^2 V^2 \sin^2 \varphi. \quad (23)$$

Međusobne varijanse napona i aktivne snage, napona i reaktivne snage, aktivne snage i reaktivne snage su:

$$\sigma_{VP} = \sigma_V^2 I \cos \varphi, \quad (24)$$

$$\sigma_{VQ} = \sigma_V^2 I \sin \varphi, \quad (25)$$

$$\sigma_{PQ} = \frac{1}{2} (\sigma_V^2 I^2 \sin 2\varphi - \sigma_\varphi^2 V^2 I^2 \sin 2\varphi + \sigma_I^2 V^2 \sin 2\varphi). \quad (26)$$

Kako se nesigurnost obično izražava u relativnim vrednostima, jednostavnije je varijanse koje se izračunavaju relacijama (22) i (23) podeliti sa kvadratom odgovarajuće merene vrednosti. Na taj način se dobija:

$$\frac{\sigma_P^2}{P^2} = \frac{\sigma_V^2}{V^2} + \frac{\sigma_I^2}{I^2} + \sigma_\varphi^2 \tan^2 \varphi, \quad (27)$$

$$\frac{\sigma_Q^2}{Q^2} = \frac{\sigma_V^2}{V^2} + \frac{\sigma_I^2}{I^2} + \sigma_\varphi^2 \cot^2 \varphi, \quad (28)$$

a međusobne varijanse iz relacija (24)-(26) mogu se napisati u sledećem obliku:

$$\frac{\sigma_{VP}}{VP} = \frac{\sigma_V^2}{V^2}, \quad (29)$$

$$\frac{\sigma_{VQ}}{VQ} = \frac{\sigma_V^2}{V^2}, \quad (30)$$

$$\frac{\sigma_{PQ}}{PQ} = \frac{\sigma_V^2}{V^2} + \frac{\sigma_I^2}{I^2} - \sigma_\varphi^2. \quad (31)$$

4.2 Korelacija pseudo merenja

Pseudo merenja predstavljaju pretpostavljene (planske) vrednosti nekih veličina, kao što su, na primer, prognozirana opterećenja u čvorovima. Pseudo merenja su „proizvedeni” podaci koji se baziraju na arhivskim podacima ili proceni dispečera, odnosno analitičara. Ona se obično uvode sukcesivno (jedno po jedno) da bi se neobservabilni delovi mreže učinili observabilnim. Ova merenja se najčešće dobijaju iz prognoze opterećenja čvorova mreže i čine ih injektirane snage u čvorovima.

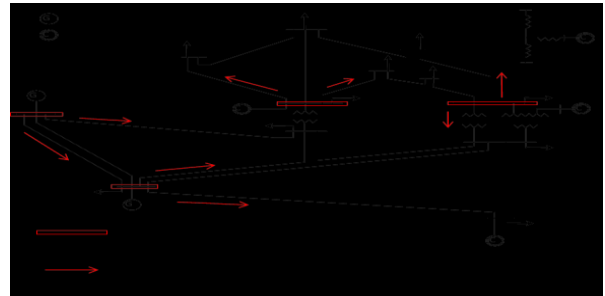
Korelacija pseudo merenja može biti prisutna između injektiranih snaga potrošačkih čvorova. Ovaj vid korelacije naziva se inter-node korelacija. Nju može uzrokovati nekoliko faktora, kao na primer sličnost potrošnje, vremenski uslovi, cena energije ili operacije upravljanja mrežom [6]. Takođe, inter-node korelacija može biti prisutna i između injektiranih snaga generatora u mreži.

Korelacija može da se pretpostavi i između injektiranja aktivne i reaktivne snage jednog čvora uzimajući u obzir čestu pretpostavku o velikom stepenu poznavanja faktora snage za HV (High Voltage) i MV (Medium Voltage) potrošače. U ovom slučaju reč je o intra-node korelaciji [4].

Ukoliko su prisutni različiti tipovi korelacije svi indirektni unakrsni faktori korelacije se moraju uzeti u obzir prilikom formiranja matrice kovarijansi merenja. Na primer, ako su injektirane snage dva potrošačka čvora korelisane, kao i aktivne i reaktivne snage svakog čvora, korelacija nastaje i između aktivne snage jednog čvora i reaktivne snage drugog čvora [6].

5. REZULTATI MODELOVANJA KORELACIJE MERENJA SA DIGITALNIH UREĐAJA

U cilju analize uticaja korelacije merenja sa digitalnih uređaja, ovi uređaji su postavljeni na lokacijama u mreži označenim na slici 1. Lokacije digitalnih uređaja su izabrane proizvoljno, bez korišćenja tehnika optimalnog postavljanja mernih uređaja.



Slika 1. Lokacije digitalnih mernih uređaja

U delu 4.1 je pokazano da korelacija između merenja koje obezbeđuje jedan digitalni uređaj strogo zavisi od samih izmerenih veličina. Zbog toga se u ovom delu ne uzima specificirana vrednost faktora korelacije, već se proračun vrši uzimajući u obzir stvarno ponašanje digitalnih uređaja. Na početku su prisutna merenja napona i struje za koje se uzima da je varijansa u slučaju merenja modula $\sigma_V^2 = \sigma_I^2 = 10^{-4}$, a u slučaju merenja faznog ugla $\sigma_\varphi^2 = 3.364 \cdot 10^{-5}$.

U tabeli 1. prikazana je srednja vrednost RMSE za module napona i fazne uglove napona za sve čvorove u mreži sa i bez modelovanja korelacije u proračunima WLS estimacije stanja. Iz tabele se vidi da uključivanjem vandijagonalnih elemenata u matricu kovarijansi merenja nema uticaja na smanjenje srednje vrednosti RMSE za module napona čvorova. Smanjenje srednje vrednosti RMSE prisutno je samo za fazne uglove napona. Na osnovu rezultata može se zaključiti da je postignuto nezatno poboljšanje u tačnosti procene promenljivih stanja.

Tabela 1. Srednja vrednost RMSE za digitalne uređaje

Model	Srednja vrednost RMSE	
	modul napona [%]	fazni ugao napona [rad]
bez korelacije	0.4957	2.7714×10^{-3}
sa korelacijom	0.4957	1.8429×10^{-3}

6. REZULTATI MODELOVANJA KORELACIJE PSEUDO MERENJA

Za vrednost varijanse modula napona je uzeta vrednost $\sigma_V^2 = 10^{-4}$, za tok aktivne i reaktivne snage $\sigma_P^2 = \sigma_Q^2 = 9 \cdot 10^{-4}$, dok je za pseudo merenja vrednost varijanse $\sigma_{P_i}^2 = \sigma_{Q_i}^2 = 0.01$. Za faktor korelacije je uzeta vrednost od 0.8.

U tabeli 2. prikazana je srednja vrednost RMSE za modul napona i fazni ugao napona čvorova kada nije modelovana inter-node korelacija i kada jeste. Iz rezultata se može videti bitno poboljšanje u smanjenju srednje vrednosti RMSE i za module napona i za fazne uglove napona.

Tabela 2. Srednja vrednost RMSE za inter-node korelaciju

Model	Srednja vrednost RMSE	
	modul napona [%]	fazni ugao napona [rad]
bez korelacije	0.1371	1.2286×10^{-3}
sa korelacijom	0.0279	2.64×10^{-5}

U drugom delu je urađeno modelovanje intra-node korelacije. Rezultati su prikazani u tabeli 3. Uzimajući u obzir korelaciju između injektiranja aktivne i reaktivne snage istog čvora iz tabele 3 vidi se uticaj prvenstveno na estimaciju faznog ugla napona. Zapravo, uzimajući u obzir intra-node korelaciju pruža se dodatna informacija o faktoru snage injektiranih snaga čvorova.

Tabela 3. Srednja vrednost RMSE za intra-node korelaciju

Model	Srednja vrednost RMSE	
	modul napona [%]	fazni ugao napona [rad]
bez korelacije	0.1371	1.2286×10^{-3}
sa korelacijom	0.1014	0.6571×10^{-3}

Test kojim su uzeti u obzir i inter-node korelacija i intra-node korelacija je takođe izveden. U tabeli 4 su prikazani rezultati srednje vrednosti RMSE za ovaj test. Na osnovu srednje vrednosti RMSE uočava se kumulativni uticaj korelacija koje su izvedene u prethodnim testovima.

Tabela 4. Srednja vrednost RMSE za inter-node i intra-node korelaciju

Model	Srednja vrednost RMSE	
	modul napona [%]	fazni ugao napona [rad]
bez korelacije	0.1371	1.2286×10^{-3}
sa korelacijom	0.0293	0.3929×10^{-3}

U cilju daljeg istraživanja uticaja korelacije na estimirane vrednosti urađena je analiza u kojoj su menjane vrednosti faktora korelacije. Vrednosti faktora korelacije su smanjene za 25%, 50% i 75% u odnosu na referentnu vrednost faktora korelacije za koju je uzeta vrednost od 0.8. Rezultati su prikazani u tabeli 5. Vidi se da je veći uticaj postignut sa većim faktorom korelacije, odnosno da su srednje vrednosti RMSE i za modul napona i za fazni ugao napona manje sa korišćenjem većeg faktora korelacije. Na kraju je potrebno primetiti da je uticaj koji je postignut promenom faktora korelacije nelinearan zbog postojanja i indirektnih unakrsnih faktora korelacije.

Tabela 5. Srednja vrednost RMSE za različite vrednosti faktora korelacije

faktor korelacije	Srednja vrednost RMSE	
	modul napona [%]	fazni ugao napona [rad]
0.8	0.0293	0.3929×10^{-3}
0.6	0.0586	0.7643×10^{-3}
0.4	0.0950	0.9857×10^{-3}
0.2	0.1171	1.0786×10^{-3}

7. ZAKLJUČAK

U radu je prikazano modelovanje korelacije merenja sa digitalnih uređaja i modelovanje različitih varijanti korelacije pseudo merenja u proračunu statičke estimacije stanja na primeru test mreže sa 14 čvorova. Za proračun je upotrebljen najčešće korišćeni algoritam u statičkoj estimaciji stanja, a to je WLS metod.

Različiti tipovi korelacije merenja su analizirani. Za digitalne merne uređaje utvrđeno je neznatno poboljšanje u tačnosti procene promenljivih stanja uključivanjem korelacije merenja.

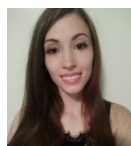
Analizirane su dve vrste korelacije pseudo merenja: inter-node i intra-node. Zaključeno je da u ovom slučaju, pravilnim uključivanjem korelacije pseudo merenja u matricu kovarijansi merenja vodi ka značajnijem poboljšanju u tačnosti procene promenljivih stanja.

Na kraju, testovi pokazuju i da je uticaj modelovanja korelacije pseudo merenja na tačnost procene promenljivih stanja veći pri korišćenju većeg faktora korelacije u proračunima. Međutim, usled postojanja indirektnih unakrsnih faktora korelacije pri uključivanju i inter-node i intra-node korelacije, uticaj promene faktora korelacije je nelinearan.

8. LITERATURA

- [1] A. Monticelli, *State estimation in electric power systems, a generalized approach*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, 1999.
- [2] Y. Chen: Weighted-Least-Square (WLS) State Estimation, *PNNL*, decembar 2015.
- [3] E. Caro, A. J. Conejo, R. Mingez: Power System State Estimation Considering Measurement Dependencies, *IEEE*, novembar 2009.
- [4] C. Muscas, M. Pau, P. A. Pegoraro, S. Sulis: Effects of Measurements and Pseudo-measurements Correlation in Distribution System State Estimation, *IEEE*, 2012.
- [5] V. Krsman: *Specijalizovani algoritmi za detekciju, identifikaciju i estimaciju loših podataka u elektrodistributivnim mrežama*, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2014.
- [6] C. Muscas, M. Pau, P. A. Pegoraro, S. Sulis: Impact of Input Data Correlation on Distribution System State Estimation, *IEEE*, 2013.

Kratka biografija:



Milena Lisov rođena je u Novom Sadu 1994. god. Diplomski rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnika i računarstvo – Elektroenergetski sistemi odbranila je 2017. god. Iste godine upisala je master studije.