



## HIBRIDNI ESTIMATOR STANJA SA STRUJAMA U PRAVOUGAONIM KOORDINATAMA ZA UKLJUČIVANJE FAZORSKIH MERENJA

### HYBRID POWER SYSTEM STATE ESTIMATION WITH PHASOR-BASED CURRENT MEASUREMENTS IN RECTANGULAR COORDINATES

Jovana Kovačević, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

#### Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

**Kratak sadržaj** – U radu je obrađen problem hibridne estimacije stanja, koja uključuje kako konvencionalna merenja, tako i sinhronizovana merenja fazora. Metod minimuma sume otežanih kvadrata reziduala merenja (WLS metod) uvažava strujna merenja u pravougaonim koordinatama.

**Ključne reči:** Estimacija stanja, Hibridni estimator stanja, Jedinica za merenje fazora (PMU), Sinhronizovana merenja fazora

**Abstract** – In this paper the hybrid state estimation based on conventional and synchronized phasor measurements is analyzed. Current measurements in rectangular coordinates are included to the Weighted Least Squares (WLS) state estimation.

**Keywords:** State estimation, Hybrid power system state estimation, Phasor Measurement Unit (PMU), Synchronized phasor measurements

#### 1. UVOD

Proračun estimacije stanja elektroenergetskog sistema (EES-a) predstavlja ključni proračun u savremenim upravljačkim centrima. Zadatak estimatora stanja jeste određivanje nepoznatih vrednosti promenljivih stanja na bazi redundantnih merenja iz sistema, gde se rezultati dobijeni ovim proračunom dalje koriste za proračun drugih sistemskih promenljivih od interesa. U svrhu procene stanja EES-a u većini slučajeva se koristi metod minimuma sume otežanih (ponderisanih) kvadrata reziduala merenja, poznatiji kao WLS (engl. Weighted Least Square) metod [1]. Cilj statičke estimacije stanja jeste najbolja moguća procena stanja EES-a u datom trenutku, koja će biti efikasna i pouzdana, a da pritom uvaži šumove pri merenjima, gubitak merenja, pogrešne parametre i slično.

Pod pojmom klasičnog estimatora stanja podrazumeva se estimator čije ulazne podatke čine konvencionalna merenja dostupna korišćenjem SCADA (engl. *Supervisory Control and Data Acquisition*) sistema. U okviru master rada objašnjeni su osnovni pojmovi u estimaciji stanja: vektor promenljivih stanja, vektor merenja, redundansa merenja, težinski faktori merenja. Takođe, opisan je algoritam WLS estimacije stanja, sa po-

#### NAPOMENA:

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

sebnim osvrtom na problem slabe uslovljenosti promenljivih.

Kako bi li se postigla veća sigurnost i efikasnije vođenje savremenog EES-a, sinhronizovana merenja fazora (u literaturi su u upotrebi i sinonimi: PMU merenja i fazorska merenja) su tehnologija koja je prepoznata kao jedno od ključnih rešenja.

#### 2. PMU MERENJA

PMU merenja se odlikuju sledećim karakteristikama [2]:

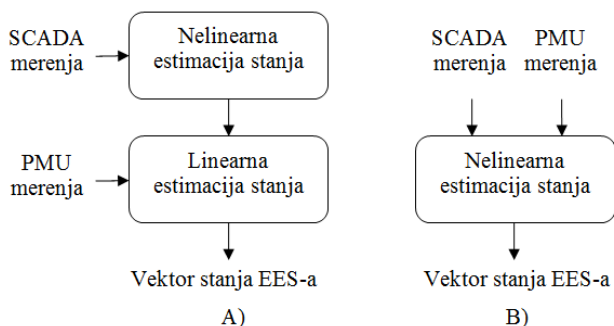
- velikom učestanošću merenja, koja se kreće i do 60 merenja u sekundi (tipični PMU uređaji generišu 48 merenja u sekundi);
- velikom tačnošću merenja;
- većom zaštićenošću od sajber napada u odnosu na konvencionalna merenja;
- značajno većom cenom u odnosu na klasična SCADA merenja.

Ugradnjom PMU uređaja u određene čvorove EES-a postaju dostupna sinhronizovana merenja fazora napona čvorova, kao i fazori struja duž grana koje su koincidentne čvorovima ugradnje. Takođe, PMU jedinica izračunava frekvenciju u sistemu, kao i brzinu promene frekvencije. Osnovna prednost PMU merenja u poređenju sa konvencionalnim merenjima dobijenim iz SCADA sistema jeste merenje uglova napona i struja u EES-u, kao i mogućnost usklađivanja merenja iz geografski udaljenih PMU jedinica – što omogućuje vremenska oznaka, nezavisno od vremena dolaska u upravljački centar.

#### 3. HIBRIDNI ESTIMATOR STANJA SA STRUJAMA U PRAVOUGAONIM KOORDINATAMA

U zavisnosti od arhitekture hibridnog modela estimatora, postoji podela na dve kategorije (kao što je prikazano na slici 1). Varijanta A) prikazuje hibridni algoritam u kom je konvencionalna merenja moguće koristiti u klasičnom nelinearnom postupku (pri čemu je EES opservabilan samo korišćenjem SCADA merenja). Rezultat klasičnog estimatora stanja predstavlja estimirani vektor stanja svih čvorova u EES-u, koji se zatim zajedno sa PMU merenjima koristi u linearnom estimatoru stanja. Osnovna mana ovakvog pristupa jeste to što dodatno uključivanje PMU merenja ne doprinosi opservabilnosti sistema, a samim tim ni detekciji i identifikaciji grubih grešaka. Varijanta B) prikazuje hibridni estimator stanja koji koristi vektor merenja sastavljen od SCADA merenja i PMU merenja, što zahteva modifikaciju algoritma u upravljačkom centru i promene u menadžment sistemu

prenosne mreže. Međutim, prednost ovog pristupa predstavlja korišćenje fazorskih zajedno sa SCADA merenjima, čime se otklanja navedena mana prvog pristupa, a istovremeno doprinosi redundansi merenja u EES-u. U ovom radu obrađena je upravo ovakva vrsta pristupa, gde se SCADA i PMU merenja kombinuju u nelinearnom estimatoru stanja.



Slika 1. Arhitekture postojećih hibridnih modela estimatora stanja [3]

### 3.1. Kombinovanje konvencionalnih i PMU merenja

Korišćenjem dve vrste vremenskih oznaka moguće je kombinovati sinhronizovana fazorska merenja i konvencionalna merenja, koja nisu sinhronizovana. U slučaju da nema trenutnog podudaranja među merenjima, jedna vrsta merenja može biti prevedena u drugu interpolacijom. Uobičajena praksa je da se za referentni fazni ugao uzima fazni ugao napona merenog u balansnom čvoru mreže. Bez gubitka opštosti, pretpostavlja se da je PMU uređaj instaliran u balansnom čvoru. Ostali fazni uglovi, mereni ili estimirani, za referentni fazni ugao uzimaju fazni ugao napona balansnog čvora [4].

### 3.2. PMU merenja u estimaciji stanja EES-a

Ukoliko bi se PMU uređaj instalirao u svakom od čvorova EES-a, opservabilnost celog sistema ostvarila bi se isključivo pomoću fazorskih merenja. Očigledno je da bi u ovom slučaju proračun estimacije stanja bio nepotreban, s obzirom da se promenljive stanja na ovaj način mere direktno. Stoga, veza merenja i promenljivih stanja je linearna, a samim tim ne postoji potreba za iterativnim postupkom i estimacijom stanja kao takvom. Osim toga što ovo nije realna opcija, s obzirom na velike cene PMU uređaja, ovaj pristup nije dobar ni iz tehničkih razloga. Naime, ako raspored PMU jedinica ne osigurava redundantnost merenja, u slučaju gubitka ili netačnosti fazorskih merenja (otkaz PMU jedinice, greška mernog transformatora, komunikacijska greška) dolazi do degradacije rezultata estimacije, uz nemogućnost detekcije i identifikacije grubih grešaka u merenju i grešaka u modelu mreže [3]. Potpunu opservabilnost sistema moguće je postići kombinovanjem konvencionalnih i fazorskih merenja, što zahteva ugradnju PMU uređaja samo u delu čvorova EES-a. Ovo je finansijski znatno isplativiji i, samim tim, dosta korišćeniji pristup s obzirom na brojnost već postojećih mernih uređaja koji čine sastavni deo SCADA sistema, čime osiguravaju redundantnost merenja. Uvođenje PMU merenja u proračun estimacije stanja ima pozitivan uticaj na ostale proračune i analize u upravljačkom centru, što

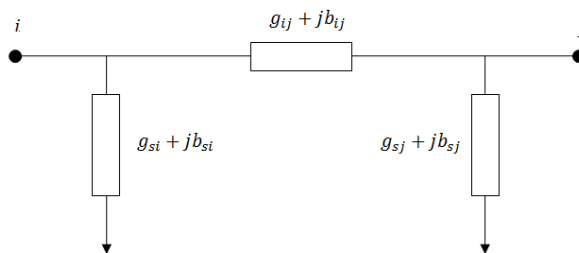
za rezultat ima veći stepen raspoloživosti EES-a i sigurnosti pogona EES-a u stvarnom vremenu.

### 3.3. Formulacija hibridnog estimatora stanja

Fazor struje  $\bar{I}_{ij} = I_{ij} \angle \theta_{ij}$ , koja teče od čvora  $i$  prema čvoru  $j$ , može primenom Prvog Kirhofovog zakona za čvor  $i$  biti izražen sledećim izrazom [1]:

$$\bar{I}_{ij} = \bar{V}_i(g_{si} + jb_{si}) + (\bar{V}_i - \bar{V}_j)(g_{ij} + jb_{ij}), \quad (1)$$

gde su fazori  $\bar{V}_i = V_i \angle \theta_i$  i  $\bar{V}_j = V_j \angle \theta_j$  naponi u čvorovima  $i$  i  $j$ , respektivno; dok  $g_{si} + jb_{si}$  predstavlja otočnu admitansu u čvoru  $i$ , a  $g_{ij} + jb_{ij}$  rednu admitansu između čvorova  $i$  i  $j$  (kao što je prikazano na slici 2, gde je sa  $g_{sj} + jb_{sj}$  označena otočna admitansu u čvoru  $j$ ).



Slika 2.  $\pi$ -model voda [1]

Direktna primena fazora struje predstavljenog preko polarnih koordinata u estimaciji stanja je moguća, pri čemu je neophodno koristiti WLS iterativni metod – s obzirom na to da je vektor stanja sastavljen od fazora napona čvorova u polarnim koordinatama, što za posledicu ima nelinearnu vezu s pojedinim elementima vektora merenja, kojeg čine konvencionalna merenja i fazori napona i struja u polarnim koordinatama. Usled slabe uslovljenosti matrice pojačanja, sa primenom ovog metoda pojavljuju se problemi sa konvergencijom proračuna. Stoga, pristup gde se fazori struja uvažavaju preko polarnih koordinata se ne preporučuje i dalje neće biti razmatran. Ovakva vrsta problema nije uočena pri primeni metoda koji koristi fazore struja predstavljene pomoću pravougaonih koordinata.

#### 3.3.1. Vektor merenja

Vektor merenja čine konvencionalna merenja, fazori napona u polarnim koordinatama (direktno se uzimaju merenja amplitude napona i ugla napona u čvoru), kao i fazori struja u pravougaonim koordinatama:

$$z = [P^T \ Q^T \ P_l^T \ Q_l^T \ \theta^T \ V^T \ I_{l,R}^T \ I_{l,I}^T]^T, \quad (2)$$

gde su:

- $P$  – vektor injektiranja aktivnih snaga u čvorovima (konvencionalna merenja);
- $Q$  – vektor injektiranja reaktivnih snaga u čvorovima (konvencionalna merenja);
- $P_l$  – vektor tokova aktivnih snaga po granama (konvencionalna merenja);
- $Q_l$  – vektor tokova reaktivnih snaga po granama (konvencionalna merenja);
- $\theta$  – vektor uglova napona u čvorovima (direktno merenja promenljive stanja, PMU merenja);
- $V$  – vektor modula napona u čvorovima (direktno merenja promenljive stanja, kombinacija konvencionalnih i PMU merenja);

$I_{LR}$  – vektor realnih komponenti tokova struja po granama (PMU merenja);

$I_{LI}$  – vektor imaginarnih komponenti tokova struja po granama (PMU merenja).

S obzirom na nelinearnu vezu kako konvencionalnih merenja, tako i merenja struje s elementima vektora stanja, jasno je da će hibridni estimator stanja sa strujama u pravougaonim koordinatama koristiti iterativnu WLS metodu.

### 3.3.2. Jakobijana matrica

Elementi matrice Jakobijana, kao i u klasičnom estimatoru stanja, dobijaju se parcijalnim izvodima po elementima vektora stanja, kojeg čine fazori napona čvorova u polarnim koordinatama. S obzirom da se fazori napona uvažavaju u polarnim, a fazori struja u pravougaonim koordinatama, elementi matrice Jakobijana predstavljani su na sledeći način:

$$H(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P(x)}{\partial \theta} & \frac{\partial P(x)}{\partial V} \\ \frac{\partial Q(x)}{\partial \theta} & \frac{\partial Q(x)}{\partial V} \\ \frac{\partial P_I(x)}{\partial \theta} & \frac{\partial P_I(x)}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_I(x)}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_I(x)}{\partial V} \\ \frac{\partial \theta(x)}{\partial \theta} & \frac{\partial \theta(x)}{\partial V} \\ \frac{\partial V(x)}{\partial \theta} & \frac{\partial V(x)}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{LR}(x)}{\partial \theta} & \frac{\partial I_{LR}(x)}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{LI}(x)}{\partial \theta} & \frac{\partial I_{LI}(x)}{\partial V} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Elementi submatrica matrice Jakobijana koji se odnose na SCADA merenja ( $\frac{\partial P(x)}{\partial \theta}$ ,  $\frac{\partial P(x)}{\partial V}$ ,  $\frac{\partial Q(x)}{\partial \theta}$ ,  $\frac{\partial Q(x)}{\partial V}$ ,  $\frac{\partial P_I(x)}{\partial \theta}$ ,  $\frac{\partial P_I(x)}{\partial V}$ ,  $\frac{\partial Q_I(x)}{\partial \theta}$ ,  $\frac{\partial Q_I(x)}{\partial V}$ ) mogu se dobiti standardnim postupkom diferenciranja jednačina za tokove snaga. Submatrice  $\frac{\partial \theta(x)}{\partial \theta}$  i  $\frac{\partial V(x)}{\partial V}$  su jedinične matrice, koje se formiraju tako što se samo na mestima na kojima se merenje ugla, odnosno amplitude napona u čvoru  $i$  podudara sa promenljivom stanja u čvoru  $i$  upisuje jedinica u koloni  $i$  odgovarajuće vrste, dok su svi ostali elementi nule. Svi elementi submatrica  $\frac{\partial \theta(x)}{\partial \theta}$  i  $\frac{\partial V(x)}{\partial V}$  su nule.

Elementi submatrica  $\frac{\partial I_{LR}(x)}{\partial \theta}$ ,  $\frac{\partial I_{LR}(x)}{\partial V}$ ,  $\frac{\partial I_{LI}(x)}{\partial \theta}$  i  $\frac{\partial I_{LI}(x)}{\partial V}$  su [1]:

$$\frac{\partial I_{ij,R}}{\partial \theta_i} = -V_i [\sin \theta_i (g_{si} + g_{ij}) + \cos \theta_i (b_{si} + b_{ij})], \quad (4)$$

$$\frac{\partial I_{ij,R}}{\partial \theta_j} = V_j (b_{ij} \cos \theta_j + g_{ij} \sin \theta_j), \quad (5)$$

$$\frac{\partial I_{ij,R}}{\partial V_i} = \cos \theta_i (g_{si} + g_{ij}) - \sin \theta_i (b_{si} + b_{ij}), \quad (6)$$

$$\frac{\partial I_{ij,R}}{\partial V_j} = b_{ij} \sin \theta_j - g_{ij} \cos \theta_j, \quad (7)$$

$$\frac{\partial I_{ij,I}}{\partial \theta_i} = -V_i [\sin \theta_i (b_{si} + b_{ij}) - \cos \theta_i (g_{si} + g_{ij})], \quad (8)$$

$$\frac{\partial I_{ij,I}}{\partial \theta_j} = V_j (b_{ij} \sin \theta_j - g_{ij} \cos \theta_j), \quad (9)$$

$$\frac{\partial I_{ij,I}}{\partial V_i} = \sin \theta_i (g_{si} + g_{ij}) + \cos \theta_i (b_{si} + b_{ij}), \quad (10)$$

$$\frac{\partial I_{ij,I}}{\partial V_j} = -b_{ij} \cos \theta_j - g_{ij} \sin \theta_j. \quad (11)$$

### 3.3.3. Nesigurnosti merenja

U slučaju hibridnog estimatora stanja sa strujama u pravougaonim koordinatama potrebne su modifikacije određenih elemenata matrice kovarijansi merenja ( $R$ ), koja u ovom slučaju više nije dijagonalna matrica.

Najpre je potrebno navesti izraz čijim se kvadriranjem dobijaju varijanse merenja [1]:

$$\sigma_i = \frac{\Delta \sigma_i}{\sqrt{3}}, \quad (12)$$

gde je  $\Delta \sigma_i$  maksimalna standardna devijacija  $i$ -tog merenja, uz pretpostavku da se radi o normalnoj raspodeli na celom rasponu nesigurnosti merenja. Maksimalne standardne devijacije merenja, koje služe za određivanje varijansi merenja, prikazane su u tabeli 1.

Tabela 1. Maksimalne standardne devijacije merenja [3]

Konvencionalna (SCADA) merenja	
Snage injektiranja	2%
Tokovi snaga	2%
Amplituda napona	0.2%
Sinhronizovana fazorska merenja	
Amplituda fazora struje	0.03%
Amplituda fazora napona	0.02%
Fazni ugao	0.01°

Polazeći od pretpostavke da su sva merenja koja učestvuju u hibridnom estimatoru stanja [prikazana izrazom (2)] međusobno nezavisna, vandijagonalni elementi u matrici kovarijansi merenja ( $R$ ) su nule. Izuzetak od ovog pravila predstavljaju isključivo merenja faznog ugla, odnosno njima odgovarajući vandijagonalni elementi u matrici kovarijansi merenja ( $R$ ), iz razloga koji će u nastavku biti objašnjen. Dakle, za sva ostala merenja odgovarajući dijagonalni elementi matrice kovarijansi predstavljani su izrazom [1]:

$$R(i, i) = \sigma_i^2, \quad (13)$$

dok su vandijagonalni elementi nule, osim u onim vrstama koje se odnose na merenja faznog ugla. S obzirom da se radi o metodi u kojoj su jedino naponi izraženi u polarnim koordinatama, isključivo u vrstama matrice kovarijansi koje odgovaraju merenjima faznog ugla napona postoje nenulti vandijagonalni elementi i predstavljani su sledećim izrazom [1]:

$$R(i, j) = \sigma_0^2, \quad (14)$$

gde je  $\sigma_0^2$  varijansa merenja faznog ugla u balansnom čvoru mreže. Naime, kao što je već spomenuto, sva merenja faznog ugla sprovode se u odnosu na fazni ugao meren PMU jedinicom u balansnom čvoru mreže. Dijagonalni elementi u matrici kovarijansi koji odgovaraju merenjima faznih uglova dati su izrazom [1]:

$$R(i, i) = \sigma_i^2 + \sigma_0^2, \quad (15)$$

pa je na ovaj način uzeta u obzir nesigurnost merenja faznog ugla u ostalim čvorovima, s obzirom na nesigurnost merenja faznog ugla u referentnom čvoru.

U zavisnosti od primenjene metode, primena PMU merenja u hibridnom estimatoru stanja zahteva određene transformacije merenja. Konkretno, u slučaju metode koja se proučava u ovom radu, reč je transformaciji fazora struja iz polarnih u pravougaone koordinate. Time se unosi povećanje nesigurnosti merenja, pa je shodno tome potrebno uvažiti nove vrednosti varijansi takvog merenja, jer su one neophodne za procenu težinskih faktora u WLS metodi. Varijanse merenja realne i imaginarnе komponente strujnih merenja, respektivno, mogu se dobiti kvadriranjem sledećih izraza, koji su posledica primene klasične teorije propagacije nesigurnosti merenja [1]:

$$\sigma_{I_{ij,R}} = \sqrt{\left(\frac{\partial I_{ij,R}}{\partial I_{ij}}\right)^2 \sigma_{I_{ij}}^2 + \left(\frac{\partial I_{ij,R}}{\partial \theta_{ij}}\right)^2 \sigma_{\theta_{ij}}^2} \quad (16)$$

$$\sigma_{I_{ij,I}} = \sqrt{\left(\frac{\partial I_{ij,I}}{\partial I_{ij}}\right)^2 \sigma_{I_{ij}}^2 + \left(\frac{\partial I_{ij,I}}{\partial \theta_{ij}}\right)^2 \sigma_{\theta_{ij}}^2} \quad (17)$$

#### 4. VERIFIKACIJA PRORAČUNA

Verifikacija proračuna izvršena je na IEEE 14 test mreži (opis mreže i različite konfiguracije merenja nalaze se u master radu). Rezultati proračuna prikazani su u tabeli 2.

Tabela 2. Estimirani naponi u polarnim koordinatama za test sistem od 14 čvorova

Čvor	Amplituda napona [r.j.]	Ugao napona [°]
1	1.06671	0.00000
2	1.04990	-5.48096
3	1.00529	-13.80275
4	1.02200	-10.54973
5	1.02700	-9.10643
6	1.08071	-14.37381
7	1.05865	-12.45693
8	1.10226	-12.86949
9	1.04696	-14.25783
10	1.04643	-14.62403
11	1.06262	-14.71309
12	1.07332	-15.40988
13	1.06751	-15.37686
14	1.04061	-15.61007

Prikazani rezultati dobijaju se nakon 12 iteracija, gde je uslov konvergencije bio  $\xi = 10^{-5}$ . Ukoliko bi se promenio uslov konvergencije, tako da se usvoji da je  $\xi = 10^{-4}$ , rezultati proračuna ne bi značajno odstupali od već izloženih, pri čemu bi proračun konvergirao nakon 9 iteracija.

Za test mrežu od 14 čvorova u master radu su dodatno diskutovni slučajevi kada se menja skup strujnih merenja koji učestvuju u hibridnom estimatoru stanja. Dakle,

pored strujnih merenja iz originalne konfiguracije merenja koriste se dodatna strujna merenja. Uslov konvergencije u ovim slučajevima je  $\xi = 10^{-4}$ . Ukoliko se uključe sva raspoloživa merenja fazora struja, u slučaju ovog test sistema potrebno je 6 iteracija da bi proračun konvergirao, ali ista brzina konvergencije može se dobiti i uključivanjem samo jednog dodatnog merenja.

#### 5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan hibridni algoritam za estimaciju stanja, koji se temelji na principima estimacije stanja podržane samo od strane SCADA sistema, ali su u nelinearnom estimatoru stanja uvažena i PMU merenja napona u polarnim koordinatama, kao i PMU merenja struja u pravougaonim koordinatama.

Na obrađenom primeru uočena je važnost izbora strujnih merenja koja će se koristiti u proračunu. Naime, od izbora čvorova u kome će PMU uređaj biti postavljen, zavisi opservabilnost EES-a, a potom i konvergencija proračuna estimacije stanja, odnosno brzina samog proračuna. Raspored strujnih merenja koja ulaze u proračun je važniji od njihovog broja, kada je reč o broju iteracija potrebnih za konvergenciju proračuna.

Bitno je napomenuti da kvalitet merenja ima veliki uticaj na tačnost reziduala dobijenih WLS metodom, pa je poseban akcenat rada stavljen na proračun i uvažavanje varijansi različitih vrsta merenja.

Primena PMU merenja u okviru proračuna estimacije stanja predstavlja jedan od ključnih faktora u izgradnji naprednih prenosnih elektroenergetskih mreža, a njihovo kombinovanje sa konvencionalnim merenjima postaje imperativ usled toga što takvo rešenje omogućava optimalno iskorišćavanje postojećih resursa.

#### 6. LITERATURA

- [1] S. Chakrabarti, E. Kyriakides, G. Ledwich, A. Ghosh, "Inclusion of PMU current phasor measurements in power system state estimator", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 4, no. 10, pp. 1104-1115, October 2010.
- [2] N. Živković, "Detekcija malicioznih napada na elektroenergetski sistem korišćenjem sinergije statičkog i dinamičkog estimatora", doktorski rad, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, 2018.
- [3] V. Kiriničić, "Hibridni algoritam estimacije stanja elektroenergetskog sustava podržan sinkroniziranim mjerenjima", doktorski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2013.
- [4] S. Chakrabarti, E. Kyriakides, G. Volverde, V. Terzija, "State estimation including synchronized measurements", *IEEE PowerTech*, Bucharest, Romania, 2009.

#### Kratka biografija:



**Jovana Kovačević** rođena je u Beogradu 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.