

OPTIMALNA ESTIMACIJA ELEKTRIČNIH PARAMETARA NADZEMNIH VODOVA POMOĆU SINHROFAZORSKIH MERENJA U REALNOM VREMENU

OPTIMAL OVERHEAD LINE PARAMETER ESTIMATION USING SYNCHROPHASORS IN REAL-TIME

Miljana TODOROVIĆ, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, PowerGrid Engineering doo Beograd,
Srbija

Zoran STOJANOVIĆ, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Precizna estimacija parametara vodova je od velike važnosti za dobijanje što tačnijih rezultata svih tipova simulacija i proračuna režima rada elektroenergetskog sistema (kao što su na primer analize tranzijentne stabilnosti sistema, proračuni tokova snaga ili proračuni kratkih spojeva), zatim u estimaciji stanja mreže, kao i za određivanje podešenja zaštitnih uređaja. Sa pojavom tehnologije sinhrofazorskih merenja, omogućena je preciznija estimacija parametara nadzemnih vodova u odnosu na klasične metode kod kojih su se parametri proračunavali na osnovu geometrije stubova, tipa provodnika, procene stvarne dužine provodnika, ugiba provodnika, otpornosti tla i drugih faktora. U radu je predstavljena metoda za estimaciju parametara transponovanog nadzemnog voda u realnom vremenu, koji se može predstaviti zamenskom π -šemom. Za estimaciju parametara je korišćena je metoda minimuma ponderisanih kvadrata odstupanja (engl. Weighted Least Square, WLS) koja koristi tri seta sinhronizovanih fazorskih merenja napona i struja na oba kraja nadzemnog voda. Rezultati su upoređeni sa vrednostima koje bi se dobile ukoliko se ne bi primenila nijedna optimizaciona metoda, i to u dva slučaja. U prvom slučaju je razmatrano prisustvo greški merenja u očekivanom opsegu, dok je u drugom slučaju razmatrano prisustvo merenja sa značajnijom greškom.

Ključne reči: Električni parametri nadzemnog voda, estimacija, sinhrofazorska merenja, WLS

ABSTRACT

The accurate determination of overhead line parameters is crucial for obtaining reliable results in various types of power system calculation, including transient stability analyses, power flow calculations, and short-circuit calculations. Additionally, it is essential for power system state estimation and for setting protective relays. With the increasing prevalence of synchrophasor technology, a more precise estimation of power line parameters has become possible compared to classical methods, which relied on factors such as tower configuration, conductor type, estimated conductor length, conductor sag, soil resistivity, and other variables. This paper introduces a method for real-time estimation of parameters for a transposed overhead line, which can be represented by an equivalent π -model. The estimation process utilizes the Weighted Least Squares (WLS) method based on three sets of synchronized phasor measurements taken at both ends of the line. The results are compared with values that would be obtained if no optimization method were applied, considering two scenarios. The first scenario considers the presence of measurement errors within the expected range, while the second scenario considers the presence of measurements with inaccurate measurement data.

Key words: Estimation theory, overhead line parameter, synchrophasor measurements, WLS

1. UVOD

U poređenju sa konvencionalnim načinom proračuna parametara nadzemnih vodova na osnovu geometrije stubova, tipa provodnika, estimacije stvarne dužine provodnika, ugiba provodnika, otpornosti tla, temperature i drugih faktora, metode koje se zasnivaju na sinhrofazorskim merenjima su značajno preciznije, čime se postiže niz benefita. Neki od tih benefita su unapređenje modela vodova koji se koriste za analizu rada elektroenergetskog sistema (EES), estimaciju stanja mreže i druge namene, zatim mogućnost provere i ažuriranja centralne baze podataka o parametrima vodova koja bi pratila modifikacije na vodima – povećanje dužine, zamenu provodnika, ugradnju rednih baterija kondenzatora na vodu i slično, kao i povećanje pouzdanosti rada distantnih zaštita voda i povećanje tačnosti estimacije lokacije kvara, što dalje vodi bržoj restauraciji mreže [1].

Na osnovu proračuna električnih parametara vodova u realnom vremenu, moguće je dalje proračunati i prosečnu temperaturu voda kao i njegov ugib i te informacije koristiti za procenu granice opterećenja provodnika u realnom vremenu, što dalje omogućava da se poveća dozvoljena snaga koja se prenosi vodom u odnosu na konzervativan pristup gde ovi podaci (temperatura i ugib) nisu dostupni u realnom vremenu [2].

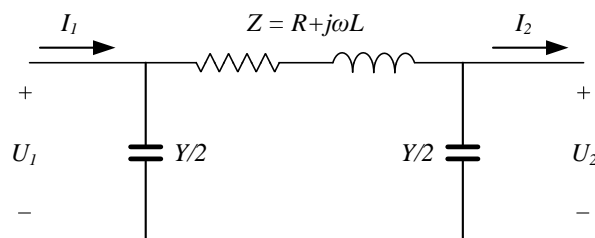
U literaturi je prisutan veći broj radova koji se bavi estimacijom parametara dalekovoda na bazi sinhrofazorskih merenja u realnom vremenu. Metode koje će biti primenjene zavise od toga da li je vod transponovan ili ne, od dužine dalekovoda (da li ga je moguće modelovati sa koncentrisanim ili distribuiranim parametrima), kao i od toga kakve smetnje u signalima očekujemo (greške u vidu Gausovog šuma ili greške u vidu prisustva outlier-a). Tako je na primer u [3] obrađena estimacija parametara transponovanog dalekovoda modelovanog pomoću zamenske šeme sa distribuiranim parametrima, dok je [4] u obrađena estimacija parametara kako transponovanog tako i netransponovanog voda modelovanog pomoću zamenske šeme sa koncentrisanim parametrima primenom M-robustnog algoritma.

U radu je prikazana metoda za estimaciju parametara nadzemnog voda u realnom vremenu modelovanog pomoću zamenske šeme sa koncentrisanim parametrima. U merenim signalima su simulirane greške u vidu Gausovog šuma, a primenjena metoda za estimaciju parametara je metoda minimuma sume poderisanih kvadrata odstupanja. Algoritam uključuje i detekciju loših merenja zasnovanu na “chi-square” testu, [5]. S obzirom da je sistem za proračun parametara voda određen u svakom trenutku, u radu će biti upoređene greške u određivanju parametara voda optimalnom estimacijom koristeći tri seta merenja i jednostavnim proračunom parametara na osnovu jednog merenja. Greška merenja je tretirana na dva načina. U prvom slučaju je razmatrano prisustvo greške merenja u očekivanom opsegu, dok je u drugom slučaju, pored očekivane greške merenja u svim signalima, dodatno razmatrano i prisustvo lošeg merenja.

2. MODEL VODA

Nadzemni vodovi se mogu klasifikovati na osnovu dužine kao kratki vodovi, vodovi srednje dužine i dugački vodovi. Za kratke vodove otočne kapacitivnosti su zanemarljive i vodovi se mogu aproksimirati samo rednom impedansom. Vodove srednje dužine je moguće modelovati zamenskom π -šemom (model sa koncentrisanim parametrima), dok se za dugačke dalekovode primenjuju modeli sa raspodeljenim parametrima.

Razvijeni algoritam koristi π -šemu za modelovanje dalekovoda, te se stoga može primeniti za slučaj kratkih i vodova srednje dužine. Zamenska π -šema voda se formira tako da redna grana predstavlja impedansu voda, dok se otočna grana, koja predstavlja admitansu voda, kao koncentrisani parametar u π -šemi voda deli na dve polovine, kao što je prikazano na slici 1.



Slika 1 – Zamenska π -šema voda

Primenom Kirhofovih zakona, dolazi se do jednačina za računanje impedanse i admitanse voda na osnovu napona i struja direktnog redosleda na početku i kraju voda:

$$\underline{Z} = \frac{U_1^2 - U_2^2}{I_1 \cdot U_2 + I_2 \cdot U_1}$$

$$\underline{Y} = 2 \cdot \frac{I_1 - I_2}{U_2 + U_1}$$

Redni parametri voda se potom određuju na osnovu sledeće jednačine:

$$R = \operatorname{Re}\{\underline{Z}\}, L = \frac{\operatorname{Im}\{\underline{Z}\}}{2\pi f},$$

dok se otopni parametri izračunavaju kao:

$$G = \operatorname{Re}\{\underline{Y}\}, L = \frac{\operatorname{Im}\{\underline{Y}\}}{2\pi f}.$$

3. METODA OPTIMIZACIJE

3.1 Metoda minimuma ponderisanih kvadrata odstupanja

Za rešavanje sistema gde je broj jednačina veći od broja nepoznatih, rešenja se mogu dobiti primenom optimizacionih metoda. Generalno, problem estimacije parametara voda se formuliše kao predefinisani sistem nelinearnih jednačina, [6]:

$$b = h(x)$$

gde su:

b – poznati vektor, dimenzije $m \times 1$,

h – poznati vektor funkcija, m funkcija

x – vektor nepoznatih, dimenzije $n \times 1$,

$m > n$.

U opštem slučaju, predefinisani sistem jednačina nema rešenje, tj. ne postoji vektor x koji tačno ispunjava zadati sistem jednačina. Iz tog razloga se uvodi rezidualni vektor:

$$r = h(x) - b$$

i izračunava rešenje x koje na neki način minimizira vektor reziduala. Vektor reziduala predstavlja greške merenja uređaja za merenje.

Kako bi se rešio ovaj problem, u praksi se primenjuje više pristupa, a jedan od najzastupljenijih je metoda minimuma sume ponderisanih kvadrata odstupanja (engl. Weighted Least Square, WLS), koja će biti korišćena u radu. Rešenje datog predefinisanih sistema jednačina x , metodom minimuma sume ponderisanih kvadrata odstupanja, minimizira sumu ponderisanih kvadrata komponenti rezidualnog vektora r . Matematički, ovo se iskazuje pomoću sledeće jednačine:

$$\text{Minimize } J = \sum_{i=1}^m w_i r_i^2 = r^T W r$$

gde su:

w_i – težinski faktor reziduala r_i ,

W – dijagonalna matrica (elementi glavne dijagonale su w_i).

Težinski faktori reziduala se uvode kako bi se uvažile razlike između merenja sa većom i merenja sa manjom tačnošću. Težinski faktori se definišu kao recipročne vrednosti varijanse greške merenja.

Koristeći jednačine nelinearnog modela, problem estimacije stanja se definiše na sledeći način:

$$\text{Minimize } J = [h(x) - b]^T W [h(x) - b]$$

Vektor nepoznatih x se dobija na osnovu rešenja sledeće jednačine:

$$\frac{dJ}{dx} = 0$$

Kako bi se rešio predefinisani sistem nelinearnih jednačina, pretpostavimo da je početno pogađanje vektora x^0 poznato. Korišćenjem Tejlorovog polinoma za funkciju r u okolini tačke x^0 , i zanemarivanjem članova višeg reda od 1, dobija se sledeća jednačina:

$$r = h(x^0) + \left. \frac{\partial h(x)}{\partial x} \right|_{x=x^0} (x - x^0) - b$$

Ako sa H označimo $H = \left. \frac{\partial h(x)}{\partial x} \right|_{x=x^0}$, a sa $b' = -h(x^0) + Hx^0 + b$, gde je vektor b' poznati vektor, dobija se iterativna jednačina:

$$x^{v+1} = x^v - (H^T W H)^{-1} H^T W [h(x^v) - b]$$

3.2 Detekcija loših merenja

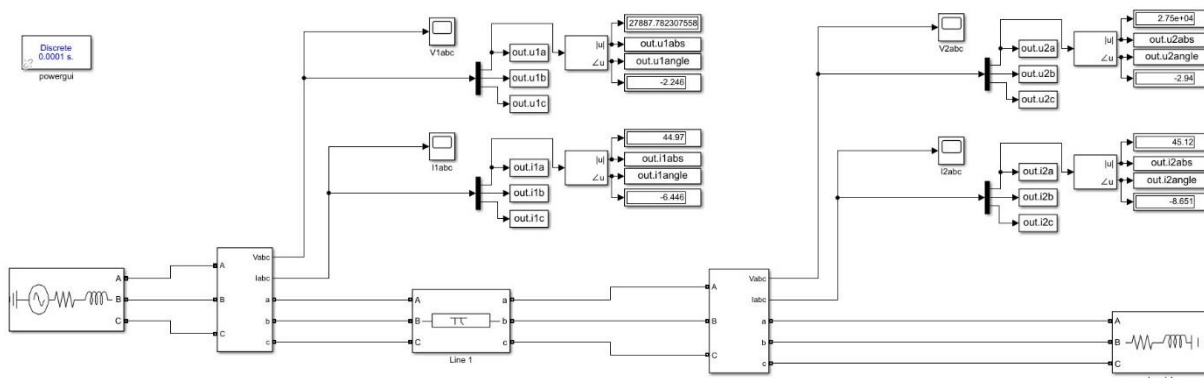
Kako bi se detektovala loša merenja, u radu je korišćena metoda zasnovana na „chi-square“ testu, opisana u [5]. Primenom ove metode, prvo se odredi očekivana vrednost sume ponderisanih kvadrata odstupanja u zavisnosti od broja stepeni slobode k . Potom se izračuna estimirana vrednost sume ponderisanih kvadrata odstupanja C_J . Ukoliko je $C_J \geq \chi_{k,\alpha}^2$, onda je verovatnoća da je prisutno loše merenje $(1 - \alpha)$. Vrednost $\chi_{k,\alpha}^2$ se može izračunati za određeno k i α na osnovu „chi-square“ raspodele. Ukoliko postoji loše merenje, ono se detektuje tako što će mu odgovarati najveća standardizovana greška. U radu je usvojeno $\alpha = 0,01$, što odgovara stepenu pouzdanosti detekcije od 99 %.

4. PROGRAM ZA ESTIMACIJU PARAMETARA VODOVA

Algoritam za estimaciju parametara vodova i detekciju loših merenja je razvijen u Matlab softverskom paketu, dok je za generisanje ulaznih podataka korišćen Matlab Simulink.

4.1 Model za generisanje ulaznih podataka

Na slici 2 je prikazan model za generisanje ulaznih podataka koji predstavljaju sinhrofazorska merenja sa jedne i druge strane voda u okviru Matlab Simulink programa. Za model voda je iskorišćen blok trofaznog voda sa jednom π sekcijom dužine 20 km sledećih podužnih parametara direktnog redosleda: otpornosti $r_l = 0,4 \Omega/\text{km}$, induktivnosti $l_l = 0,0013 \text{ H/km}$ i kapacitivnosti $c_l = 10^{-9} \text{ F/km}$.



Slika 2 – Model za generisanje ulaznih podataka

4.2 Program za estimaciju parametara vodova i detekciju loših merenja

U okviru programa za estimaciju parametara vodova sa mogućnošću detekcije loših merenja su učitavana merenja fazora napona i struja na početku i na kraju voda. Simulirane vrednosti napona i struja su normalizovane, a potom su na vrednosti ovih fazora dodavane greške u vidu Gausovog belog šuma, srednje vrednosti 0 i varijanse $(0,0033)^2$. Ovako formirana merenja su korišćena kao ulazni podaci u razvijeni algoritam za estimaciju parametara voda. Učitavanje je vršeno za tri različita radna režima koja su definisana različitim zadatim profilima aktivne i reaktivne potrošnje.

Jednačine sistema za model sa slike 1 se mogu napisati i u sledećoj formi:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 - \underline{Z} \cdot \underline{I}_1 + \underline{Z} \cdot \frac{Y}{2} \cdot \underline{I}_1 - \underline{U}_2 e^{j\delta} &= 0 \\ \underline{I}_1 - \frac{Y}{2} \cdot \underline{U}_1 - \frac{Y}{2} \cdot \underline{U}_2 e^{j\delta} - \underline{I}_2 e^{j\delta} &= 0 \end{aligned}$$

gde je uvažan i ugao sinhronizacije δ . Uvažavanje ugla sinhronizacije δ prilikom definisanja modela omogućava kasnije detekciju potencijalne greške u sinhronizaciji.

Fazori napona i struja kao i sinhronizacioni ugao ($\delta=0$) su poznata merenja. Ako je N broj merenja, merenih veličina ima $8N+1$ (za svaki fazor se razdvajaju merenja amplitude i ugla).

Broj nepoznatih je broj merenih veličina ($8N+1$) uvećan za 3, odnosno za nepoznatu rezistansu, reaktansu i susceptansu voda. Stoga se vektor nepoznatih X definiše na sledeći način:

$$X = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_{8N} \quad x_{8N+1} \quad x_{8N+2} \quad x_{8N+3} \quad x_{8N+4}]$$

gde su:

x_1, x_1, \dots, x_{8N} – varijable koje predstavljaju $4N$ kompleksnih merenja

x_{8N+1} – ugao sinhronizacije

$x_{8N+2}, x_{8N+3}, x_{8N+4}$ – rezistansa, reaktansa i susceptansa voda u relativnim jedinicama.

Prvih $8N$ nepoznatih parametara su definisani na sledeći način:

$$x_{8i-7} = \text{abs}(U_{1i}), x_{8i-6} = \text{angle}(U_{1i}), x_{8i-5} = \text{abs}(I_{1i}), x_{8i-4} = \text{angle}(I_{1i})$$

$$x_{8i-3} = \text{abs}(U_{2i}), x_{8i-2} = \text{angle}(U_{2i}), x_{8i-1} = \text{abs}(I_{2i}), x_{8i} = \text{angle}(I_{2i}), \text{ za } i = 1, \dots, N$$

Koristeći prethodno definisane oznake, jednačine sistema je moguće napisati u sledećem obliku:

$$f_{2i-1}(x) = x_{8i-7}e^{jx_{8i-6}} - (x_{8N+2} + jx_{8N+3}) \cdot x_{8i-5}e^{jx_{8i-4}} + 0,5 \cdot jx_{8N+4} \cdot (x_{8N+2} + jx_{8N+3}) \cdot x_{8i-5}e^{jx_{8i-4}} - x_{8i-3}e^{jx_{8i-2}}e^{jx_{8N+1}} = 0$$

$$f_{2i}(x) = x_{8i-5}e^{jx_{8i-4}} - 0,5 \cdot jx_{8N+4} \cdot x_{8i-7}e^{jx_{8i-6}} - 0,5 \cdot jx_{8N+4} \cdot x_{8i-3}e^{jx_{8i-2}}e^{jx_{8N+1}} - x_{8i-1}e^{jx_{8i}}e^{jx_{8N+1}} = 0$$

Razdvajanjem članova u jednačini na realne i imaginarne i izjednačavanjem sa nulom, dobija se $4N$ jednačina sistema. Sada je broj elemenata ulazne matrice $4N+8N+1$, odnosno $12N+1$.

Za rešavanje predefinisano sistema nelinearnih jednačina je korišćena prethodno opisana metoda minimizacije sume ponderisanih kvadrata odstupanja. Rešenje se dobija primenom Newton-Raphson-ove metode.

5. REZULTATI

U radu su razmatrana dva slučaja estimacije parametara voda. U prvom slučaju je pretpostavljeno da su mereni signali bez prisustva loših merenja (slučaj A), dok je u drugom slučaju razmatrano prisustvo lošeg merenja u ulaznim veličinama.

5.1 Slučaj A - bez prisustva loših merenja

U ovom slučaju nije razmatrano prisustvo lošeg merenja, već je ulazni vektor merenja formiran sa pretpostavkom prisustva samo Gausovog belog šuma varijanse $0,0033^2$ u svim merenim veličinama. Zadato je da sva merenja imaju istu varijansu greške merenja od $1 \cdot 10^{-4}$. Ulazna merenja i optimalne estimacije parametara voda su date u tabelama 1 i 2. Vrednost funkcije C_J je u ovom slučaju $0,5775$, a kako je $\chi_{9,0,01}^2 = 21,666$, zaključeno je da ne postoji prisustvo loših merenja.

Iz table 2 se može videti da su greške u estimaciji otpornosti, induktivnosti i kapacitivnosti $1,1\%$, $2,88\%$ i $7,54\%$ respektivno. Poslednja tri reda u tabeli 2 odgovaraju slučajevima gde se parametri voda računaju samo na osnovu jednog merenja, i to redom samo na osnovu prvog, drugog ili trećeg merenja. Uočava se da su greške u tom slučaju značajno veće i da praktično te procene nisu upotrebljive.

Tabela 1 – Tabela ulaznih merenja i optimalne estimacije merenja bez prisustva loših merenja

Veličina	Generisano merenje	Merenje sa šumom	Optimalna estimacija
U_{11} (p.u.)	0,9379-0,0647i	0,9349-0,0587i	0,9369-0,0596i
I_{11} (p.u.)	0,8952-0,1651i	0,8926-0,1636i	0,8928-0,1638i
U_{21} (p.u.)	0,9029-0,0889i	0,9063-0,0869i	0,9042-0,086i
I_{21} (p.u.)	0,894-0,1793i	0,8921-0,1798i	0,8918-0,1796i
U_{12} (p.u.)	0,9185-0,0625i	0,9164-0,0655i	0,916-0,0642i
I_{12} (p.u.)	1,0234-0,3502i	1,0188-0,3463i	1,0206-0,3464i
U_{22} (p.u.)	0,8732-0,085i	0,8701-0,0853i	0,8705-0,0865i
I_{22} (p.u.)	1,0223-0,364i	1,0228-0,3615i	1,021-0,3615i
U_{13} (p.u.)	0,9635-0,049i	0,9645-0,0474i	0,9625-0,0486i
I_{13} (p.u.)	0,5639-0,0623i	0,5625-0,062i	0,5643-0,0621i
U_{23} (p.u.)	0,9428-0,0655i	0,9377-0,0683i	0,9398-0,0672i
I_{23} (p.u.)	0,5631-0,077i	0,5667-0,0781i	0,565-0,0779i
δ (u stepenima)	0	0	0,0160

Tabela 2 – Tabela optimalne estimacije parametara voda i poređenje sa računskim vrednostima za slučaj bez prisustva loših merenja

	$R / R_{est} / R_{calc}$ [Ohm]	R_{err} [%]	$X / X_{est} / X_{calc}$ [Ohm]	X_{err} [%]	$B / B_{est} / B_{calc}$ [Ohm ⁻¹]	B_{err} [%]
Ulazno	8	/	8,1681	/	6,2832e-5	/
3 merenja	7,9122	1,1	8,4033	2,88	6,7571e-5	7,54
1. merenje	6,1366	23,29	8,919	9,19	7,1521e-5	13,83
2. merenje	8,4395	5,49	7,6739	6,05	6,727e-5	7,06
3. merenje	10,3441	29,3	10,3339	26,51	6,7697e-5	7,74

5.1 Slučaj B - prisustvo lošeg merenja

Veće greške u merenjima struje i napona mogu dovesti do neprihvatljivih greški u estimaciji parametara. Slučaj u kome postoji prisustvo lošeg merenja je generisano dodavanjem greške od 10% u signal napona na početku voda kod prvog merenja. Prethodno je na sve ulazne fazore dodat Gausov šum na isti način kao i u slučaju A. U tabelama 3 i 4 su data ulazna merenja i optimalne estimacije parametara voda u prisustvu lošeg merenja. Vrednost funkcije C_J je u ovom slučaju 23,7365, tako da se može sumnjati na prisustvo lošeg merenja, pa se dalje određuju standardizovane greške za svaku nepoznatu veličinu. Određivanjem standardizovanih grešaka, U_{11} se uspešno identifikuje kao loše merenje.

Nakon identifikacije lošeg merenja, isto se eliminiše iz ulaznog vektora i ponavlja se postupak koristeći sve ostale veličine. U ponovljenom proračunu vrednost funkcije C_J je 0,4301, a s obzirom da je $\chi_{7,0,01}^2 = 18,475$, potvrđuje se ispravna detekcija lošeg merenja. Estimacija parametara voda nakon eliminacije lošeg merenja je data u tabeli 6, gde se vidi značajno unapređenje tačnosti estimacije.

Tabela 3 – Tabela ulaznih merenja i optimalne estimacije merenja u prisustvu lošeg merenja

Veličina	Generisano merenje	Merenje sa šumom	Optimalna estimacija
U_{11} (p.u.)	0,9379-0,0647i	1,0408-0,0729i	1,0185-0,073i
I_{11} (p.u.)	0,8952-0,1651i	0,8981-0,1672i	0,8986-0,1656i
U_{21} (p.u.)	0,9029-0,0889i	0,9065-0,0909i	0,9288-0,0912i
I_{21} (p.u.)	0,894-0,1793i	0,8952-0,1765i	0,8963-0,1788i
U_{12} (p.u.)	0,9185-0,0625i	0,917-0,0638i	0,9321-0,0667i
I_{12} (p.u.)	1,0234-0,3502i	1,0228-0,3475i	1,0224-0,3466i
U_{22} (p.u.)	0,8732-0,085i	0,88-0,0829i	0,865-0,08i
I_{22} (p.u.)	1,0223-0,364i	1,022-0,3612i	1,0216-0,3613i
U_{13} (p.u.)	0,9635-0,049i	0,9679-0,0543i	0,9745-0,0519i
I_{13} (p.u.)	0,5639-0,0623i	0,5645-0,0591i	0,5641-0,06i
U_{23} (p.u.)	0,9428-0,0655i	0,9465-0,0612i	0,94-0,0635i
I_{23} (p.u.)	0,5631-0,077i	0,5633-0,0794i	0,5631-0,0785i
δ (u stepenima)	0	0	-0,0069

Tabela 4 – Tabela optimalne estimacije parametara voda i poređenje sa računskim vrednostima u slučaju prisustva loših merenja

	$R / R_{est} / R_{calc}$ [Ohm]	R_{err} [%]	$X / X_{est} / X_{calc}$ [Ohm]	X_{err} [%]	$B / B_{est} / B_{calc}$ [Ohm ⁻¹]	B_{err} [%]
Ulazno	8	/	8,1681	/	6,2832e-5	/
3 merenja	16,8209	110,26	8,2566	1,08	6,7404e-5	7,28
1. merenje	34,4761	330,95	11,549	41,39	3,9682e-5	36,84
2. merenje	6,5006	18,74	6,8278	16,41	6,1961e-5	1,39
3. merenje	8,8102	10,13	4,0521	50,39	8,6464e-5	37,61

Tabela 5 – Tabela ulaznih merenja i optimalne estimacije merenja nakon eliminacije lošeg merenja

Veličina	Generisano merenje	Merenje sa šumom	Optimalna estimacija
U_{11} (p.u.)	/	/	0,9363-0,0729i
I_{11} (p.u.)	0,8952-0,1651i	0,8981-0,1672i	0,8975-0,1653i
U_{21} (p.u.)	0,9029-0,0889i	0,9065-0,0909i	0,9065-0,0909i
I_{21} (p.u.)	0,894-0,1793i	0,8952-0,1765i	0,8958-0,1784i
U_{12} (p.u.)	0,9185-0,0625i	0,917-0,0638i	0,9175-0,0647i
I_{12} (p.u.)	1,0234-0,3502i	1,0228-0,3475i	1,0228-0,3471i
U_{22} (p.u.)	0,8732-0,085i	0,88-0,0829i	0,8796-0,082i
I_{22} (p.u.)	1,0223-0,364i	1,022-0,3612i	1,022-0,3615i
U_{13} (p.u.)	0,9635-0,049i	0,9679-0,0543i	0,9667-0,0527i
I_{13} (p.u.)	0,5639-0,0623i	0,5645-0,0591i	0,5644-0,0599i
U_{23} (p.u.)	0,9428-0,0655i	0,9465-0,0612i	0,9478-0,0628i
I_{23} (p.u.)	0,5631-0,077i	0,5633-0,0794i	0,5633-0,0786i
δ (u stepenima)	0	0	-0,0901

Tabela 6 – Tabela optimalne estimacije parametara voda i poređenje sa računskim vrednostima nakon eliminacije lošeg merenja

	R / R_{est} [Ohm]	R_{err} [%]	X / X_{est} [Ohm]	X_{err} [%]	B / B_{est} [Ohm ⁻¹]	B_{err} [%]
Ulazno	8	/	8,1681	/	6,2832e-5	/
3 merenja	6,9057	13,68	6,6441	18,66	7,3827e-5	17,5

6. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana metoda za optimalnu estimaciju parametara voda modelovanog π -šemom zasnovana na sinhofazorskim merenjima struja i napona na početku i na kraju voda. Merenja su generisana u Matlab Simulink programu, na koja su kasnije dodavane greške u vidu Gausovog šuma. Za metodu estimacije je izabrana metoda minimuma ponderisanih kvadrata odstupanja, a program uključuje i algoritam za detekciju loših merenja.

Rezultati su upoređeni sa rezultatima proračuna parametara ukoliko se ne bi primenila nijedna metoda optimizacije (već bi se parametri direktno računali na osnovu merenja struja i napona za svako merenje posebno) i ukazano je na veliku prednost primene optimizacionih metoda. Međutim, greške u estimaciji parametara čak i primenom optimizacione metode su značajne, tj. mogu biti i do 20-ak procenata. Jasno je da će sa manjom pretpostavljenom varijansom ulaznog šuma i greška estimacije biti manja, tako da je pre primene ove metode bitno imati u vidu preciznost uređaja za sinhrofazorska merenja i potrebnu tačnost estimacije parametara. Takođe, veći broj merenja dovodi do preciznije estimacije parametara. Sa druge strane, što su vodovi duži, tj. većih vrednosti parametara, to su i pomenuti algoritmi tačniji, pa je tačnost estimacije parametara za vodove u prenosnim sistemima veća nego u slučaju distributivnih vodova.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržalo Ministarstvo za nauku, tehnološki razvoj i inovacije Republike Srbije po ugovoru broj: 451-03-65/2024-03/200103.

LITERATURA

- [1] Brian K. Johnson, Cat Wong, Sal Jadid, Validation of Transmission Line Relay Parameters Using Synchrophasors, Presented at the 41st Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, October 14-16, 2014, Originally presented at the 68th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, April 2014 (SEL No. 6653)
- [2] Yan Du and Y. Liao, "Online estimation of power transmission line parameters, temperature and sag," 2011 North American Power Symposium, Boston, MA, 2011, pp. 1-6, doi: 10.1109/NAPS.2011.6024854.
- [3] Y. Liao and M. Kezunovic, "Online Optimal Transmission Line Parameter Estimation for Relaying Applications," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 1, pp. 96-102, Jan. 2009, doi: 10.1109/TPWRD.2008.2002875.
- [4] V. Milojević, S. Čalija, G. Rietveld, M. V. Ačanski and D. Colangelo, "Utilization of PMU Measurements for Three-Phase Line Parameter Estimation in Power Systems," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 67, no. 10, pp. 2453-2462, Oct. 2018, doi: 10.1109/TIM.2018.2843098.
- [5] J. Grainger and W. Stevenson, Power System Analysis. New York: McGraw-Hill, 1994.

- [6] M. Kezunovic, S. Meliopoulos, S. Venkatasubramanian, V. Vittal, “Application of Time-Synchronized Measurements in Power System Transmission Networks,” Springer, ISBN 978-3-319-06218-1, 2014.