

Optimalna estimacija električnih parametara netransponovanih vodova korišćenjem sinhrofazorskih merenja

Miljana Todorović*, Zoran Stojanović**

* Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, PowerGrid Engineering d.o.o. Beograd, Srbija

** Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Srbija

Rezime - U radu je predstavljena metoda za estimaciju parametara netransponovanog dalekovoda, koji se može predstaviti zamenskom π -šemom, u realnom vremenu. Za estimaciju parametara je korišćena metoda minimuma ponderisanih kvadrata odstupanja (engl. Weighted Least Square, WLS) koja koristi tri seta sinhronizovanih fazorskih merenja napona i struja na oba kraja dalekovoda, od kojih minimalno jedno merenje sadrži dovoljno nulte komponente napona. Metoda je primenjiva u opštem slučaju - za transponovane i netransponovane dalekovode, simetrično ili nesimetrično opterećene. Primenom predstavljene metode moguće je proračunati vrednosti sopstvenih i međusobnih impedansi, kao i susceptansi. Prelaskom u sistem simetričnih komponenti, izračunavaju se impedanse i susceptanse direktnog, inverznog i nultog redosleda, kao i međusobne impedanse između direktnog, inverznog i nultog redosleda.

Parametri netransponovanog voda su određivani u dva različita slučaja. Merenja napona i struja na oba kraja dalekovoda su generisana u okviru MATLAB Simulink softvera gde su određeni odgovarajući fazori, koji su kasnije bili ulazni podaci za proračun. U prvom idealizovanom slučaju nije uvaženo prisustvo greške merenja, dok je u drugom slučaju modelovana greška merenja u ulaznim podacima. U oba slučaja su primenjene dve metode: prva, koja nepoznate parametre netransponovanog voda estimira na osnovu jednačina za netransponovani dalekovod, i druga, koja nepoznate parametre estimira na osnovu jednačina transponovanog voda.

KLjučne reči - Električni parametri netransponovanog dalekovoda, estimacija, sinhrofazorska merenja, WLS

I UVOD

Proračuni parametara dalekovoda su od velike važnosti za dobijanje preciznijih rezultata različitih programa za analizu elektroenergetskih sistema, ali i što preciznijih podešenja distantnih zaštita dalekovoda. Pre pojave sinhrofazorskih merenja, metode za određivanje parametara dalekovoda su se zasnivale na proračunima koji uvažavaju geometriju stuba, tip provodnika, estimaciju stvarne dužine provodnika i ugiba provodnika, otpornost tla, temperaturu i druge faktore, ili na primarnim merenjima dok je dalekovod van pogona. Sa pojavom metoda estimacije parametara vodova na osnovu sinhrofazorskih merenja na oba kraja dalekovoda u realnom vremenu, pored preciznijih estimacija koje imaju značaj u već navedenim primerima, otvara još niz mogućnosti, kao što su na primer proračun prosečne temperature voda i njegovog ugiba u realnom

vremenu, zatim mogućnost provere i ažuriranja centralne baze podataka o parametrima vodova koja bi pratila modifikacije na dalekovodima - povećanje dužine, zamenu provodnika, ugradnju rednih baterija kondenzatora na vodu i slično, [1], [2].

Iako se u literaturi najčešće spominju metode za određivanje parametara direktnog redosleda transponovanih vodova srednje dužine, svakako su prisutni i radovi koji obrađuju kompleksnije modele dalekovoda. Obrađene su teme estimacije parametara dugačkih dalekovoda, tj. dalekovoda modelovanih zamenskom šemom sa distribuiranim parametrima [3], kao i estimacije parametara netransponovanih vodova modelovanih šemom sa koncentrisanim parametrima [4], [5]. Greške merenja su modelovane ili u vidu Gausovog šuma (gde su kasnije primenjivanje metode minimizacije sume kvadrata odstupanja) ili uz prisustvo „outlier“-a (gde je potom primenjivan M-robustni algoritam).

S obzirom na veću kompleksnost modela za estimaciju parametara netransponovanih vodova u odnosu na modele za estimaciju transponovanih vodova, a i kako su u praksi najčešće potrebne estimacije samo impedansi i susceptansi direktnog, inverznog i nultog redosleda (ne i sve sopstvene i međusobne impedanse, odnosno susceptanse dalekovoda), u radu je izvršeno poređenje rezultata koji se dobijaju primenom oba algoritma u slučaju estimacije parametara netransponovanih vodova. Netransponovani dalekovod čiji se parametri određuju je modelovan pomoću zamenske šeme sa koncentrisanim parametrima. U ulaznim podacima programa, tj. merenim signalima napona i struja na oba kraja dalekovoda su modelovane greške u vidu Gausovog šuma, a primenjena metoda za estimaciju parametara je metoda minimuma sume ponderisanih kvadrata odstupanja.

II SINHROFAZORSKA TEHNOLOGIJA

Sinhrofazorska merenja su precizna, vremenski sinhronizovana merenja električnih veličina elektroenergetskog sistema, dostupna pomoću uređaja koji se nazivaju PMU uređaji (engl. *Phasor Measurement Unit*). PMU uređaj može da bude samostalan uređaj ili funkcija u okviru mikroprocesorskog zaštitnog uređaja. Veličine koje PMU uređaji mogu meriti su sinhronizovani fazori struje i napona, frekvencija i brzina promene frekvencije (engl. *ROCOF*). Fazni ugao sinhrofazorskih merenja je izražen u odnosu na referentni fazor koji je sinhronizovan prema UTC vremenu, čime je omogućeno da merenja sa različitih lokacija budu vremenski sinhronizovana. Za sinhronizaciju se koriste precizni časovnici tačnosti od ± 500 ns,

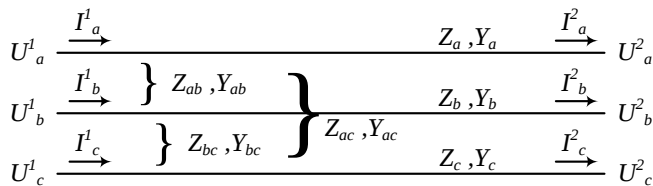
kompatibilni sa standardima koji uređuju oblast sinhronog merenja vremena.

U odnosu na široko primenjenu SCADA tehnologiju za nadzor, tehnologija sinhrofazorskih merenja ima niz prednosti. Prvo, SCADA analogna merenja su dostupna za efektivne vrednosti napona i struja, kao i za vrednosti aktivne i reaktivne snage, dok su sinhrofazorska merenja dostupna za fazore struje i napona, frekvenciju i brzinu promene frekvencije. Sinhrofazorska merenja su daleko veće rezolucije, tipično 10 do 60 snimaka u sekundi u poređenju sa jednim SCADA merenjem na tipično 2 do 4 sekunde. Dodatno, sinhrofazorska merenja imaju vremensku sinhronizaciju i preciznu vremensku referencu korišćenjem standardom definisanog vremena.

U poslednjih desetak godina, sinhrofazorska merenja su sve više u primeni kroz razne aplikacije, kao što su na primer upravljanje elektroenergetskim sistemom na širokom geografskom području (engl. *wide-area control*), validacija modela sistema, određivanje granica stabilnosti, određivanje maksimalnih dozvoljenih opterećenja u sistemu, detekcija ostrvskog rada, snimanje poremećaja u sistemu, u estimaciji stanja u EES-u, i brojne druge. Sinhrofazorska merenja se mogu primeniti i za rešavanje problema estimacije parametara dalekovoda u realnom vremenu, što će biti prikazano u radu.

III MATRICA IMPEDANSI DALEKOVODA

Model trofaznog dalekovoda sa označenim sopstvenim i međusobnim impedansama je prikazan na slici 1.



Slika 1. Model trofaznog dalekovoda

Električni parametri dalekovoda su definisani pomoću matrice rednih impedansi ($\underline{Z} = R + jX$) i matrice otočnih admitansi ($\underline{Y} = jB$):

$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} Z_a & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_b & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_c \end{bmatrix}, \quad \underline{Y} = \begin{bmatrix} Y_a & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ab} & Y_b & Y_{bc} \\ Y_{ac} & Y_{bc} & Y_c \end{bmatrix}$$

Za konverziju fazora napona i struja iz „abc“ sistema u sistem simetričnih komponenti, i obrnuto, koristi se Fortescue-ova matrica. Ako je kompleksni operator $\underline{a} = (-1/2 + j\sqrt{3}/2)$, Fortescue-ova matrica i njena inverzna su sledećeg oblika:

$$\underline{F} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix}, \quad \underline{F}^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix}$$

Između faznih veličina u „abc“ sistemu i veličina u sistemu simetričnog redosleda, važi da je:

$$\underline{U}_{abc} = \underline{F} \cdot \underline{U}_{0di}, \quad \underline{I}_{abc} = \underline{F} \cdot \underline{I}_{0di}$$

Matrica impedansi u simetričnom sistemu izračunava iz

prethodno definisanih matrica, na sledeći način, [6].

$$\underline{Z}_{sym} = \underline{F}^{-1} \cdot \underline{Z} \cdot \underline{F} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_0 & \underline{Z}_{0d} & \underline{Z}_{0i} \\ \underline{Z}_{d0} & \underline{Z}_d & \underline{Z}_{di} \\ \underline{Z}_{i0} & \underline{Z}_{id} & \underline{Z}_i \end{bmatrix}$$

U opštem slučaju, postoji veza između komponenti direktnog, inverznog i nultog redosleda.

Ukoliko je vod transponovan, sve međusobne impedanse su jednake. Ako sopstvene i međusobne impedanse označimo sa $\underline{Z}_s = \underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$ i $\underline{Z}_m = \underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca}$, dobija se deкуплована matrica simetričnih komponenti transponovanog voda:

$$\underline{Z}_{sym} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_s + 2\underline{Z}_m & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_s - \underline{Z}_m & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_s - \underline{Z}_m \end{bmatrix},$$

gde je $\underline{Z}_0 = \underline{Z}_s + 2\underline{Z}_m$, $\underline{Z}_d = \underline{Z}_s - \underline{Z}_m$ i $\underline{Z}_i = \underline{Z}_s - \underline{Z}_m$. U tom slučaju se impedanse nultog, direktnog i inverznog redosleda mogu određivati samo na osnovu napona i struja nultog, direktnog i inverznog redosleda, respektivno.

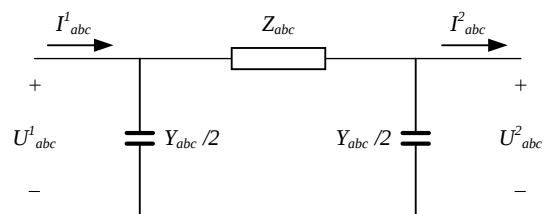
IV MODEL VODA

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.

U radu su razvijena dva algoritma za proračun parametara dalekovoda, od kojih jedan koristi model netransponovanog voda, dok drugi koristi model transponovanog voda (kod koga su sistemi nultog, direktnog i inverznog redosleda deкупловани). Razvijeni algoritmi koriste π -šemu za modelovanje dalekovoda, te se stoga mogu primenjivati 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 slikama 2 i 3.

A Model netransponovanog voda

Zamenska šema netransponovanog voda srednje dužine je prikazana na slici 2.



Slika 2. Zamenska π -šema netransponovanog voda

Primenom Kirhofovih zakona, dolazi se do jednačina matrica impedansi i matrica admitansi voda na osnovu napona i struja na početku i kraju voda:

$$\underline{U}_{abc}^1 - \underline{U}_{abc}^2 = \underline{Z}_{abc} \cdot \left(\underline{I}_{abc}^1 - \frac{1}{2} \cdot \underline{Y}_{abc} \cdot \underline{U}_{abc}^1 \right)$$

$$\underline{I}_{abc}^1 - \underline{I}_{abc}^2 = \frac{1}{2} \cdot \underline{Y}_{abc} \cdot (\underline{U}_{abc}^1 + \underline{U}_{abc}^2)$$

Kako bi se problem rešavao primenom linearne metode optimizacije, prva jednačina se definiše u sledećem obliku:

$$\underline{y}_p \cdot (\underline{U}_{abc}^1 - \underline{U}_{abc}^2) = \underline{I}_{abc}^1 - \frac{1}{2} \cdot \underline{Y}_{abc} \cdot \underline{U}_{abc}^1,$$

$$\text{gde je } \underline{y}_p = \underline{Z}_{abc}^{-1} = \begin{bmatrix} \underline{y}_a & \underline{y}_{ab} & \underline{y}_{ac} \\ \underline{y}_{ab} & \underline{y}_b & \underline{y}_{bc} \\ \underline{y}_{ac} & \underline{y}_{bc} & \underline{y}_c \end{bmatrix}.$$

U matričnom formatu, jednačine su sledećeg oblika:

$$\begin{bmatrix} \underline{y}_a & \underline{y}_{ab} & \underline{y}_{ac} \\ \underline{y}_{ab} & \underline{y}_b & \underline{y}_{bc} \\ \underline{y}_{ac} & \underline{y}_{bc} & \underline{y}_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_a^1 - \underline{U}_a^2 \\ \underline{U}_b^1 - \underline{U}_b^2 \\ \underline{U}_c^1 - \underline{U}_c^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{I}_a^1 \\ \underline{I}_b^1 \\ \underline{I}_c^1 \end{bmatrix} - j \frac{1}{2} \begin{bmatrix} B_a & B_{ab} & B_{ac} \\ B_{ab} & B_b & B_{bc} \\ B_{ac} & B_{bc} & B_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_a^1 \\ \underline{U}_b^1 \\ \underline{U}_c^1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_a^1 - \underline{U}_a^2 \\ \underline{U}_b^1 - \underline{U}_b^2 \\ \underline{U}_c^1 - \underline{U}_c^2 \end{bmatrix} = -j \frac{1}{2} \begin{bmatrix} B_a & B_{ab} & B_{ac} \\ B_{ab} & B_b & B_{bc} \\ B_{ac} & B_{bc} & B_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_a^1 \\ \underline{U}_b^1 \\ \underline{U}_c^1 \end{bmatrix}$$

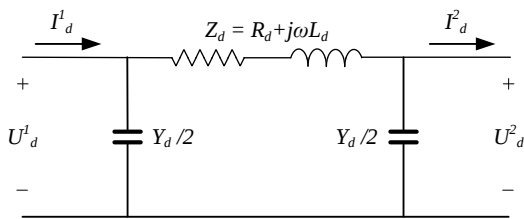
Daljim razvojem navedenih jednačina u matričnoj formi, izvodi se 6 jednačina u kompleksnom domenu, odnosno 12 jednačina nakon izdvajanja realnih i imaginarnih delova.

Nepoznate veličine su elementi matrice impedansi $\underline{Z}_{abc}$, kao i matrice susceptansi $\underline{B}_{abc}$. Kako su vandijagonalni elementi pomenutih matrica simetrični, broj nepoznatih veličina je 18.

B Model transponovanog voda

Osnovna razlika modelovanja transponovanog voda u odnosu na netransponovani, jeste mogućnost da se formiraju tri nezavisne zamenske šeme, za sisteme nultog, direktnog i inverznog redosleda.

Na slici 3 je data zamenska šema transponovanog voda za sistem direktnog redosleda.



Slika 3. Zamenska π -šema transponovanog voda za sistem direktnog redosleda

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:

$$\underline{U}_d^1 - \underline{U}_d^2 = \underline{Z}_d \cdot \left(\underline{I}_d^1 - \frac{1}{2} \cdot \underline{Y}_d \cdot \underline{U}_d^1 \right)$$

$$\underline{I}_d^1 - \underline{I}_d^2 = \frac{1}{2} \cdot \underline{Y}_d \cdot (\underline{U}_d^1 + \underline{U}_d^2)$$

Broj nepoznatih parametara u ovom slučaju je tri - $Re\{\underline{Z}_d\}$, $Im\{\underline{Z}_d\}$, $Im\{\underline{Y}_d\}$, dok se na osnovu prethodne dve jednačine u kompleksnom domenu izvode četiri jednačine izdvajanjem realnih i imaginarnih delova. Za određivanje parametara nultog redosleda, postupak je analogan prethodno definisanom.

V METODA MINIMUMA PONDERISANIH KVADRATA ODSTUPANJA ZA LINEARNI SLUČAJ

Za rešavanje sistema gde je broj jednačina veći od broja nepoznatih, koristi se neka od optimizacionih metoda. Generalno, definisani problem estimacije parametara voda se formuliše kao predefinisani sistem linearnih jednačina, [7]:

$$\mathbf{b} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{x}$$

gde su:

$\mathbf{b}$ - poznati vektor, dimenzije $m \times 1$,

$\mathbf{H}$ - poznata matrica, dimenzije $m \times n$,

$\mathbf{x}$ - vektor nepoznatih, dimenzije $n \times 1$, $m > n$.

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

$$\mathbf{r} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{x} - \mathbf{b}$$

i izračunava rešenje $\mathbf{x}$ 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 $\mathbf{x}$, metodom minimuma sume ponderisanih kvadrata odstupanja, minimizira sumu ponderisanih kvadrata komponenti rezidualnog vektora $\mathbf{r}$. Matematički, ovo se iskazuje pomoću sledeće jednačine:

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

gde su:

w_i - težinski faktor reziduala r_i ,

$\mathbf{W}$ - 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 linearnog modela, problem estimacije stanja se definiše na sledeći način:

$$\text{Minimize } \mathbf{J} = [\mathbf{H} \cdot \mathbf{x} - \mathbf{b}]^T \mathbf{W} [\mathbf{H} \cdot \mathbf{x} - \mathbf{b}]$$

Vektor nepoznatih $\mathbf{x}$ se dobija na osnovu rešenja sledeće jednačine, $d\mathbf{J}/d\mathbf{x} = 0$:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{b}$$

VI PROGRAM ZA ESTIMACIJU PARAMETARA DALEKOVODA

Program za estimaciju parametara dalekovoda je razvijen u Matlab softverskom paketu, dok je za generisanje ulaznih podataka koji predstavljaju sinhrofazorska merenja napona i struja sa obe strane dalekovoda korišćen Matlab Simulink. Za model dalekovoda je iskorišćen blok trofaznog netransponovanog voda, parametara datih u Tabeli 1.

U okviru programa za estimaciju parametara dalekovoda su razvijene dve funkcije - jedna koja problem estimacije parametara vodova rešava na osnovu jednačina netransponovanog voda (Metoda 1), i druga koja problem estimacije parametara vodova rešava na osnovu jednačina transponovanog voda, tj. raspregnutih jednačina za sisteme nultog, direktnog i inverznog redosleda (Metoda 2). Rezultati koji se dobijaju na osnovu ove dve metode su upoređeni na primeru estimacije parametara netransponovanog voda.

A Program za estimaciju parametara netransponovanih vodova (Metoda 1)

Za izradu programa za estimaciju parametara netransponovanih vodova, korišćene su jednačine sistema modela sa slike 2, a koje se mogu napisati u sledećoj formi:

$$\begin{aligned} \underline{y}_a \cdot \Delta \underline{U}_a + \underline{y}_{ab} \cdot \Delta \underline{U}_b + \underline{y}_{ac} \cdot \Delta \underline{U}_c &= \underline{I}_a - j \frac{1}{2} \cdot (B_a \cdot \underline{U}_a^1 + B_{ab} \cdot \underline{U}_b^1 + B_{ac} \cdot \underline{U}_c^1) \\ \underline{y}_{ab} \cdot \Delta \underline{U}_a + \underline{y}_b \cdot \Delta \underline{U}_b + \underline{y}_{bc} \cdot \Delta \underline{U}_c &= \underline{I}_b - j \frac{1}{2} \cdot (B_{ab} \cdot \underline{U}_a^1 + B_b \cdot \underline{U}_b^1 + B_{bc} \cdot \underline{U}_c^1) \\ \underline{y}_{ac} \cdot \Delta \underline{U}_a + \underline{y}_{bc} \cdot \Delta \underline{U}_b + \underline{y}_c \cdot \Delta \underline{U}_c &= \underline{I}_c - j \frac{1}{2} \cdot (B_{ac} \cdot \underline{U}_a^1 + B_{bc} \cdot \underline{U}_b^1 + B_c \cdot \underline{U}_c^1) \\ \Delta \underline{I}_a &= -j \frac{1}{2} \cdot (B_a \cdot \underline{U}_a^1 + B_{ab} \cdot \underline{U}_b^1 + B_{ac} \cdot \underline{U}_c^1) \\ \Delta \underline{I}_b &= -j \frac{1}{2} \cdot (B_{ab} \cdot \underline{U}_a^1 + B_b \cdot \underline{U}_b^1 + B_{bc} \cdot \underline{U}_c^1) \\ \Delta \underline{I}_c &= -j \frac{1}{2} \cdot (B_{ac} \cdot \underline{U}_a^1 + B_{bc} \cdot \underline{U}_b^1 + B_c \cdot \underline{U}_c^1), \end{aligned}$$

gde su $\Delta \underline{U}_x = \underline{U}_x^1 - \underline{U}_x^2$, i $\Delta \underline{I}_x = \underline{I}_x^1 - \underline{I}_x^2$, $x = a, b, c$.

Fazori napona i struja su poznata merenja. Ako je N broj merenja, merenih veličina ima $24N$ (za svaki fazor se razdvajaju merenja amplitude i ugla).

Vektor nepoznatih X se definiše na sledeći način:

$$\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_{18}]$$

gde su:

$$x_1, x_1, \dots, x_{12} - \text{elementi matrice } \underline{\mathbf{y}}_p = \underline{\mathbf{Z}}_{abc}^{-1} = \begin{bmatrix} \underline{y}_a & \underline{y}_{ab} & \underline{y}_{ac} \\ \underline{y}_{ab} & \underline{y}_b & \underline{y}_{bc} \\ \underline{y}_{ac} & \underline{y}_{bc} & \underline{y}_c \end{bmatrix},$$

$$\underline{\mathbf{y}}_p = \begin{bmatrix} x_1 + jx_2 & x_7 + jx_8 & x_{11} + jx_{12} \\ x_7 + jx_8 & x_3 + jx_4 & x_9 + jx_{10} \\ x_{11} + jx_{12} & x_9 + jx_{10} & x_5 + jx_6 \end{bmatrix},$$

$$x_{13}, x_{14}, \dots, x_{18} - \text{elementi matrice } \mathbf{B}_{abc} = \begin{bmatrix} x_{13} & x_{16} & x_{18} \\ x_{16} & x_{14} & x_{17} \\ x_{18} & x_{17} & x_{15} \end{bmatrix}.$$

Razdvajanjem članova u jednačini na realne i imaginarne delove, dobija se $12N$ jednačina sistema, prikazanih u Dodatku. Za rešavanje definisanog sistema $12N$ linearnih jednačina sa 18 nepoznatih je korišćena prethodno opisana metoda minimizacije sume ponderisanih kvadrata odstupanja.

B Program za estimaciju parametara transponovanih vodova (Metoda 2)

Za izradu programa za estimaciju parametara transponovanih vodova, korišćene su jednačine sistema modela sa slike 3, a koje se mogu napisati u kompleksnom domenu u sledećoj formi:

$$\begin{aligned} \underline{y}_d \cdot \Delta \underline{U}_d &= \underline{I}_d^1 - j \frac{1}{2} \cdot B_d \cdot \underline{U}_d^1 \\ \Delta \underline{I}_d &= -j \frac{1}{2} \cdot B_d \cdot \underline{U}_d^1 \end{aligned}$$

gde su $\Delta \underline{U}_d = \underline{U}_d^1 - \underline{U}_d^2$, i $\Delta \underline{I}_d = \underline{I}_d^1 - \underline{I}_d^2$, a $\underline{y}_d = \underline{Z}_d^{-1}$.

U sistemu nultog redosleda, jednačine se zadaju analogno, tj.:

$$\begin{aligned} \underline{y}_0 \cdot \Delta \underline{U}_0 &= \underline{I}_0^1 - j \frac{1}{2} \cdot B_0 \cdot \underline{U}_0^1 \\ \Delta \underline{I}_0 &= -j \frac{1}{2} \cdot B_0 \cdot \underline{U}_0^1 \end{aligned}$$

gde su $\Delta \underline{U}_0 = \underline{U}_0^1 - \underline{U}_0^2$, i $\Delta \underline{I}_0 = \underline{I}_0^1 - \underline{I}_0^2$, a $\underline{y}_0 = \underline{Z}_0^{-1}$.

Fazori napona i struja u „abc“ sistemu su poznata merenja, iz kojih se primenom Fortescue-ove transformacije izračunavaju naponi i struje direktnog, inverznog i nultog redosleda na oba kraja dalekovoda. Kako su sistemi nultog, direktnog i inverznog redosleda raspregnuti za slučaj transponovanog voda, to su program za proračun parametara nultog i program za proračun parametara direktnog redosleda dalekovoda nezavisni. Za svaki od programa, broj merenih veličina je $8N$ (za svaki fazor se razdvajaju merenja amplitude i ugla), ako je N broj merenja.

Vektor nepoznatih $\mathbf{x}$ u programu za proračun parametara dalekovoda direktnog redosleda se definiše na sledeći način:

$$\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]$$

gde su:

$$\begin{aligned} x_1 + jx_2 &= \underline{y}_d = \underline{Z}_d^{-1} \\ x_3 &= B_d \end{aligned}$$

U slučaju proračuna parametara dalekovoda nultog redosleda, vektor nepoznatih $\mathbf{x}$ se definiše na sledeći način:

$$\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]$$

gde su:

$$\begin{aligned} x_1 + jx_2 &= \underline{y}_0 = \underline{Z}_0^{-1} \\ x_3 &= B_0 \end{aligned}$$

Razdvajanjem članova u gore navedenim jednačinama na realne i imaginarne delove, dobija se $4N$ jednačina sistema:

$$\begin{aligned} \text{Re}(\underline{I}_d^1) &= x_1 \cdot \text{Re}(\Delta \underline{U}_d) - x_2 \cdot \text{Im}(\Delta \underline{U}_d) - \frac{1}{2} \cdot x_3 \cdot \text{Im}(\underline{U}_d^1) \\ \text{Re}(\Delta \underline{I}_d) &= -\frac{1}{2} \cdot x_3 \cdot \text{Im}(\underline{U}_d^1 + \underline{U}_d^2) \\ \text{Im}(\underline{I}_d^1) &= x_1 \cdot \text{Im}(\Delta \underline{U}_d) + x_2 \cdot \text{Re}(\Delta \underline{U}_d) + \frac{1}{2} \cdot x_3 \cdot \text{Re}(\underline{U}_d^1) \\ \text{Im}(\Delta \underline{I}_d) &= \frac{1}{2} \cdot x_3 \cdot \text{Re}(\underline{U}_d^1 + \underline{U}_d^2) \end{aligned}$$

U ovom slučaju je metoda minimizacije sume ponderisanih kvadrata odstupanja korišćena za rešavanje definisanog sistema od $4N$ linearnih jednačina sa 3 nepoznata parametra.

Gore navedene formule se zadaju analogno i za sistem nultog redosleda.

VII REZULTATI

U radu su razmatrana dva slučaja estimacije parametara netransponovanog voda, gde u prvom slučaju (slučaj A) nije uvažena greška merenja fazora, za razliku od drugog slučaja (slučaj B) gde je modelovana i greška uređaja za merenje

sinhrofazora. Prvi slučaj je upotrebljen kako bi se verifikovao rad programa koji koristi jednačine za netransponovani dalekovod (Metoda 1), ali i odredile greške programa koji koristi jednačine za transponovani dalekovod (Metoda 2) u estimaciji parametara netransponovanog dalekovoda. Na ovaj način se mogu izdvojiti greške u estimaciji primenom druge metode koje su dominantno posledica primene uprošćenog modela.

U drugom slučaju je modelovana i greška uređaja za sinhrofazorska merenja, a potom su takođe upoređeni rezultati estimacije koji se dobijaju primenom Metode 1 i Metode 2. Urađen je veći broj simulacija, kako bi se dobili okviri u kojima se nalaze estimirane vrednosti parametara, a postupak je ponovljen za različite dužine dalekovoda.

A Slučaj A - nije uvažena greška merenja

Kao što je navedeno, u prvom slučaju nije razmatrano prisustvo greške merenja, a primer je poslužio da bi se uporedile greške estimacije parametara pomoću dve prethodno opisane metode. Estimacije su urađene na osnovu tri seta merenja, pri čemu je u

svakom setu merenja bilo prisutno nesimetrično opterećenje po fazama. Dodatno, u jednom merenju je simuliran zemljospoj u mreži što za posledicu ima prisustvo nultog napona u jednom od merenja. Kvar nije simuliran na dalekovodu, jer se, generalno u praksi, mogu iskoristiti i merenja koja odgovaraju trenutku kada se npr. na nekom od susednih dalekovoda desio kvar.

Rezultati estimacije parametara netransponovanog dalekovoda primenom prve i druge metode, dati su u Tabeli 1. Kako se model za transponovani vod bazira na pretpostavci simetričnog modela sistema, koji omogućava raspredanje jednačina direktnog, inverznog i nultog sistema, očekivano se beleže greške u estimaciji impedanse i susceptanse kako direktnog tako i nultog redosleda. Apsolutne greške estimacije parametara direktnog i nultog redosleda netransponovanog dalekovoda prvom metodom su ispod 1%, dok se u slučaju primene druge metode beleže značajnije greške, i preko 10%. S obzirom da je zanemarena greška merenja, ova odstupanja u estimaciji parametara prilikom primene Metode 2 su dominantno posledica primene modela koji zanemaruje činjenicu da je vod netransponovan.

Tabela 1. Estimacija parametara netransponovanog voda metodom 1 i metodom 2 za vod dužine 100 km bez uvažene greške merenja

Veličina	Zadati parametar	Metoda 1		Metoda 2	
		Estimirani parametar	Relativna greška [%]	Estimirani parametar	Relativna greška [%]
$R_0 (\Omega)$	23,0724	22,8891	0,79	26,0533	12,92
$R_1 (\Omega)$	6,0959	6,0884	0,12	5,9107	3,04
$X_0 (\Omega)$	131,0672	130,6972	0,28	128,8177	1,72
$X_1 (\Omega)$	39,7632	39,6899	0,18	39,5448	0,55
$B_0 (\mu S)$	158,7931	159,0001	0,13	158,5785	0,14
$B_1 (\mu S)$	288,4368	288,7246	0,10	296,6907	2,86
$R_a (\Omega)$	11,8283	11,8140	0,12	/	/
$R_b (\Omega)$	11,6821	11,2670	3,55	/	/
$R_c (\Omega)$	11,7538	11,9849	1,97	/	/
$R_{ab} (\Omega)$	5,6584	5,3408	5,61	/	/
$R_{ac} (\Omega)$	5,6954	5,6929	0,04	/	/
$R_{bc} (\Omega)$	5,6228	5,7671	2,57	/	/
$L_a (mH)$	223,2297	222,7835	0,20	/	/
$L_b (mH)$	223,6642	223,2638	0,18	/	/
$L_c (mH)$	223,4466	222,6485	0,36	/	/
$L_{ab} (mH)$	87,6457	87,3879	0,29	/	/
$L_{ac} (mH)$	101,3835	100,8962	0,48	/	/
$L_{bc} (mH)$	101,6006	101,4011	0,20	/	/
$C_a (\mu F)$	0,7985	0,7987	0,02	/	/
$C_b (\mu F)$	0,7716	0,7726	0,13	/	/
$C_c (\mu F)$	0,7716	0,7729	0,17	/	/
$C_{ab} (\mu F)$	-0,1176	-0,1174	0,18	/	/
$C_{ac} (\mu F)$	-0,1176	-0,1174	0,21	/	/
$C_{bc} (\mu F)$	-0,1774	-0,1781	0,40	/	/

* $Z_1 = Z_2$, $B_1 = B_2$

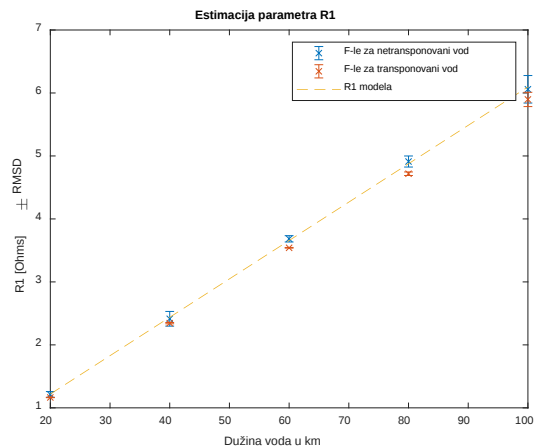
A Slučaj B - modelovana greška merenja

U drugom slučaju su vrednosti fazora napona i struja dobijene iz simulacija normalizovane, a potom su na vrednosti ovih fazora dodavane greške u vidu Gausovog belog šuma, srednje vrednosti 0 i varijanse $(0,001)^2$. Ovako formirana merenja su korišćena kao ulazni podaci u programe za estimaciju parametara dalekovoda. Svaki set estimacije parametara je dobijen na osnovu merenja iz tri različita radna režima, koja su definisana različitim zadatim profilima aktivne i reaktivne

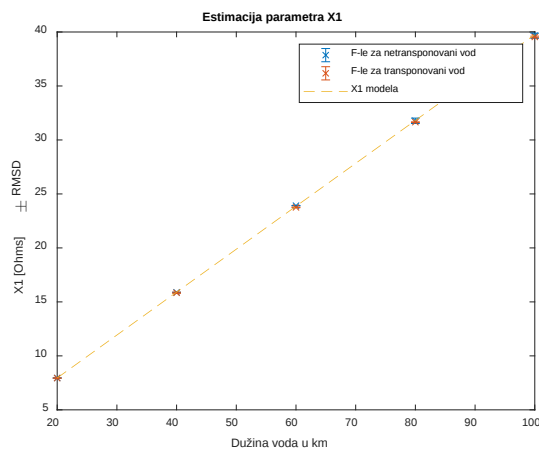
potrošnje. Opterećenja su zadata nesimetrično po fazama, a u makar jednom merenju je prisutna i nulta komponenta napona.

Dodatno, analizirana je estimacija parametara dalekovoda različitih dužina, i to dužina od 20, 40, 60, 80 i 100 km. Za svaku zadatu dužinu dalekovoda, urađeno je 20 puta po 3 simulacije različitih pogonskih uslova, kako bi se dobilo 20 različitih estimacija za svaki nepoznati parametar primenom Metode 1 i primenom Metode 2. Zatim je određena srednja vrednost estimacije parametara, kao i koren srednje vrednosti

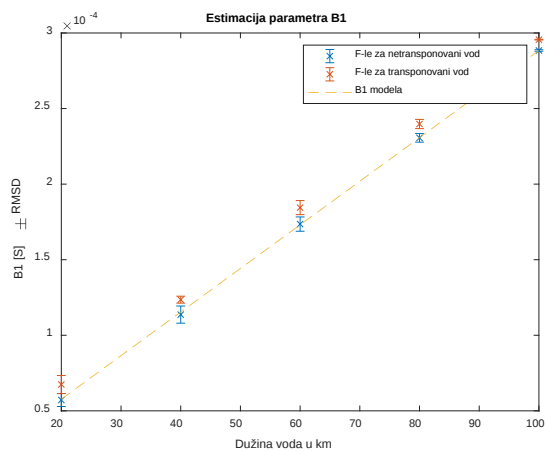
kvadrata odstupanja za svaki od parametara (engl. *Root Mean Square Error Deviation, RMSD*), a rezultati dobijeni na taj način su prikazani na slikama 4 do 9. Uz rezultate programa za estimaciju, na slikama je isprekidanom linijom prikazana i zadata vrednost parametara u modelu.



Slika 4. Estimacija otpornosti dalekovoda direktnog redosleda

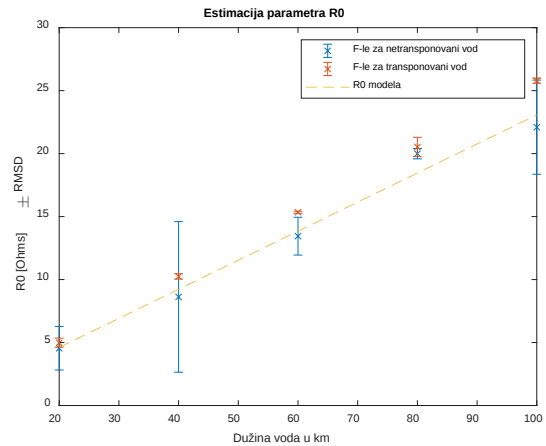


Slika 5. Estimacija reaktanse dalekovoda direktnog redosleda

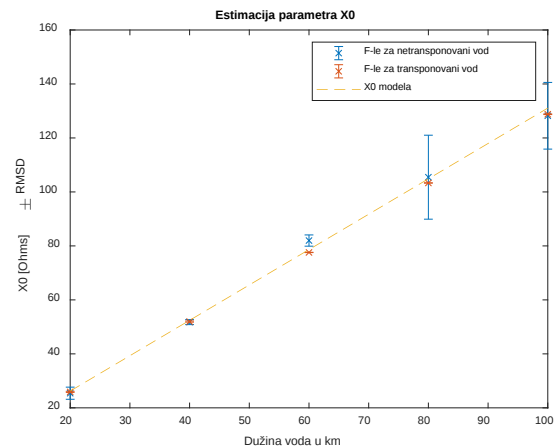


Slika 6. Estimacija susceptanse dalekovoda direktnog redosleda

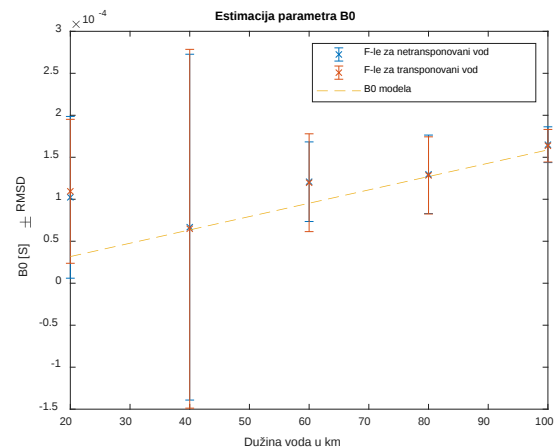
Na slikama od 4 do 6 su prikazane estimacije parametara direktnog redosleda, i to redom otpornosti, reaktanse i susceptanse dalekovoda. Na osnovu prikazanih rezultata, može se uočiti prednost primene algoritma koji uvažava nesimetričnost vodova, jer su estimacije tačnije, a i varijacije u estimacijama slične ili manje.



Slika 7. Estimacija otpornosti dalekovoda nultog redosleda



Slika 8. Estimacija reaktanse dalekovoda nultog redosleda



Slika 9. Estimacija susceptanse dalekovoda direktnog redosleda

Na slikama od 7 do 9 su prikazane estimacije otpornosti, reaktanse i susceptanse dalekovoda nultog redosleda. Sa slike 9 se može videti da oba algoritma daju nepouzdanu estimaciju susceptanse nultog redosleda. Prilikom određivanja otpornosti i reaktanse nultog redosleda, uočava se da je algoritam koji koristi jednačine za netransponovani vod mnogo osetljiviji na prisustvo greški u ulaznim podacima, tj. mnogo je veći opseg u kome se može naći estimirana vrednost. Osetljivost je izraženija kod estimacije otpornosti nultog redosleda, jer je otpornost gotovo za red veličine manja od induktivnosti.

Dakle, na osnovu urađenih simulacija, pokazalo se da se primenom Metode 1 dobijaju tačniji rezultati u slučaju procene parametara direktnog redosleda dalekovoda, dok se primenom Metode 2 dobijaju pouzdanije estimacije u proceni parametara nultog redosleda. To dalje dovodi do zaključka da je za estimaciju parametara netransponovanog dalekovoda najbolje koristiti kombinaciju ove dve metode, na način da se za estimaciju parametara dalekovoda direktnog redosleda koristi metoda koja uvažava nesimetričnost vodova, a da se za estimaciju parametara dalekovoda nultog redosleda koristi metoda koja ne uvažava nesimetričnost vodova jer se pokazalo da je robusnija na prisustvo greški u merenjima.

VIII ZAKLJUČAK

U radu su predstavljena dva algoritma za proračun parametara dalekovoda, od kojih je jedan zasnovan na jednačinama

netransponovanog dalekovoda (Metoda 1), dok je drugi zasnovan na jednačinama transponovanog dalekovoda (Metoda 2). Oba algoritma su primenjena na primeru estimacije parametara netransponovanog voda, a rezultati su pokazali da se primenom Metode 1 dobijaju tačnije estimacije parametara dalekovoda direktnog redosleda, dok se primenom Metode 2 dobijaju stabilnije estimacije (sa manje varijacija) prilikom estimacija parametara nultog redosleda. Stoga je predlog da se za estimaciju parametara netransponovanog dalekovoda koristi kombinacija oba algoritma, i to prvog (koji uvažava nesimetriju dalekovoda) za estimaciju parametara direktnog redosleda, a drugog (robusnijeg, koji ne uvažava nesimetriju dalekovoda) za estimaciju parametara dalekovoda nultog redosleda.

S obzirom na uočenu osetljivost algoritama (posebno kompleksnijeg algoritma koji koristi jednačine netransponovanih vodova) na prisustvo greški u merenjima, bilo bi od velikog značaja testirati algoritam i sa realnim merenjima, gde bi se pored stvarnih, a ne modelovanih greški uređaja za sinhrofazorska merenja, dodatno uvažile i greške strujnih i naponskih zaštitnih mernih transformatora.

IX ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržalo Ministarstvo za nauku, tehnološki razvoj i inovacije Republike Srbije po ugovoru broj: 451-03-137/2025-03/200103.

X DODATAK

Formule netransponovanog dalekovoda u kompleksnom domenu se nakon izdvajanja realnog i imaginarnog dela, zapisuju na sledeći način:

$$Re(\underline{I}_a^1) = x_1 \cdot Re(\Delta \underline{U}_a) - x_2 \cdot Im(\Delta \underline{U}_a) + x_7 \cdot Re(\Delta \underline{U}_b) - x_8 \cdot Im(\Delta \underline{U}_b) + x_{11} \cdot Re(\Delta \underline{U}_c) - x_{12} \cdot Im(\Delta \underline{U}_c) - \frac{1}{2} \cdot x_{13} \cdot Im(\underline{U}_a^1) - \frac{1}{2} \cdot x_{16} \cdot Im(\underline{U}_b^1) - \frac{1}{2} \cdot x_{18} \cdot Im(\underline{U}_c^1)$$

$$Re(\underline{I}_b^1) = x_7 \cdot Re(\Delta \underline{U}_a) - x_8 \cdot Im(\Delta \underline{U}_a) + x_3 \cdot Re(\Delta \underline{U}_b) - x_4 \cdot Im(\Delta \underline{U}_b) + x_9 \cdot Re(\Delta \underline{U}_c) - x_{10} \cdot Im(\Delta \underline{U}_c) - \frac{1}{2} \cdot x_{16} \cdot Im(\underline{U}_a^1) - \frac{1}{2} \cdot x_{14} \cdot Im(\underline{U}_b^1) - \frac{1}{2} \cdot x_{17} \cdot Im(\underline{U}_c^1)$$

$$Re(\underline{I}_c^1) = x_{11} \cdot Re(\Delta \underline{U}_a) - x_{12} \cdot Im(\Delta \underline{U}_a) + x_9 \cdot Re(\Delta \underline{U}_b) - x_{10} \cdot Im(\Delta \underline{U}_b) + x_5 \cdot Re(\Delta \underline{U}_c) - x_6 \cdot Im(\Delta \underline{U}_c) - \frac{1}{2} \cdot x_{18} \cdot Im(\underline{U}_a^1) - \frac{1}{2} \cdot x_{17} \cdot Im(\underline{U}_b^1) - \frac{1}{2} \cdot x_{15} \cdot Im(\underline{U}_c^1)$$

$$Re(\Delta \underline{I}_a) = -\frac{1}{2} \cdot x_{13} \cdot Im(\underline{U}_a^1 + \underline{U}_a^2) - \frac{1}{2} \cdot x_{16} \cdot Im(\underline{U}_b^1 + \underline{U}_b^2) - \frac{1}{2} \cdot x_{18} \cdot Im(\underline{U}_c^1 + \underline{U}_c^2)$$

$$Re(\Delta \underline{I}_b) = -\frac{1}{2} \cdot x_{16} \cdot Im(\underline{U}_a^1 + \underline{U}_a^2) - \frac{1}{2} \cdot x_{14} \cdot Im(\underline{U}_b^1 + \underline{U}_b^2) - \frac{1}{2} \cdot x_{17} \cdot Im(\underline{U}_c^1 + \underline{U}_c^2)$$

$$Re(\Delta \underline{I}_c) = -\frac{1}{2} \cdot x_{18} \cdot Im(\underline{U}_a^1 + \underline{U}_a^2) - \frac{1}{2} \cdot x_{17} \cdot Im(\underline{U}_b^1 + \underline{U}_b^2) - \frac{1}{2} \cdot x_{15} \cdot Im(\underline{U}_c^1 + \underline{U}_c^2)$$

$$Im(\underline{I}_a^1) = x_1 \cdot Im(\Delta \underline{U}_a) + x_2 \cdot Re(\Delta \underline{U}_a) + x_7 \cdot Im(\Delta \underline{U}_b) + x_8 \cdot Re(\Delta \underline{U}_b) + x_{11} \cdot Im(\Delta \underline{U}_c) + x_{12} \cdot Re(\Delta \underline{U}_c) + \frac{1}{2} \cdot x_{13} \cdot Re(\underline{U}_a^1) + \frac{1}{2} \cdot x_{16} \cdot Re(\underline{U}_b^1) + \frac{1}{2} \cdot x_{18} \cdot Re(\underline{U}_c^1)$$

$$Im(\underline{I}_b^1) = x_7 \cdot Im(\Delta \underline{U}_a) + x_8 \cdot Re(\Delta \underline{U}_a) + x_3 \cdot Im(\Delta \underline{U}_b) + x_4 \cdot Re(\Delta \underline{U}_b) + x_9 \cdot Im(\Delta \underline{U}_c) + x_{10} \cdot Re(\Delta \underline{U}_c) + \frac{1}{2} \cdot x_{16} \cdot Re(\underline{U}_a^1) + \frac{1}{2} \cdot x_{14} \cdot Re(\underline{U}_b^1) + \frac{1}{2} \cdot x_{17} \cdot Re(\underline{U}_c^1)$$

$$Im(\underline{I}_c^1) = x_{11} \cdot Im(\Delta \underline{U}_a) + x_{12} \cdot Re(\Delta \underline{U}_a) + x_9 \cdot Im(\Delta \underline{U}_b) + x_{10} \cdot Re(\Delta \underline{U}_b) + x_5 \cdot Im(\Delta \underline{U}_c) + x_6 \cdot Re(\Delta \underline{U}_c) + \frac{1}{2} \cdot x_{18} \cdot Re(\underline{U}_a^1) + \frac{1}{2} \cdot x_{17} \cdot Re(\underline{U}_b^1) + \frac{1}{2} \cdot x_{15} \cdot Re(\underline{U}_c^1)$$

$$Im(\Delta \underline{I}_a) = \frac{1}{2} \cdot x_{13} \cdot Re(\underline{U}_a^1 + \underline{U}_a^2) + \frac{1}{2} \cdot x_{16} \cdot Re(\underline{U}_b^1 + \underline{U}_b^2) + \frac{1}{2} \cdot x_{18} \cdot Re(\underline{U}_c^1 + \underline{U}_c^2)$$

$$Im(\Delta \underline{I}_b) = \frac{1}{2} \cdot x_{16} \cdot Re(\underline{U}_a^1 + \underline{U}_a^2) + \frac{1}{2} \cdot x_{14} \cdot Re(\underline{U}_b^1 + \underline{U}_b^2) + \frac{1}{2} \cdot x_{17} \cdot Re(\underline{U}_c^1 + \underline{U}_c^2)$$

$$Im(\Delta \underline{I}_c) = \frac{1}{2} \cdot x_{18} \cdot Re(\underline{U}_a^1 + \underline{U}_a^2) + \frac{1}{2} \cdot x_{17} \cdot Re(\underline{U}_b^1 + \underline{U}_b^2) + \frac{1}{2} \cdot x_{15} \cdot Re(\underline{U}_c^1 + \underline{U}_c^2)$$

LITERATURA

- [1] Johnson, B.K., Wong, C., Jadid, S. Validation of Transmission Line Relay Parameters Using Synchrophasors, in Proc. *41st Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, Washington, October 14-16, 2014. <https://selinc.com/api/download/104514?id=104514> [pristupljeno 16.01.2025]
- [2] Du, Y., Liao, Y. Online estimation of power transmission line parameters, temperature and sag, in Proc. *2011 North American Power Symposium*, Boston, MA, pp. 1-6, 4-6 August, 2011. <https://doi.org/10.1109/NAPS.2011.6024854>
- [3] Liao, Y., Kezunovic, M. Online Optimal Transmission Line Parameter Estimation for Relaying Applications, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 1, pp. 96-102, 2009. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.2002875>
- [4] Milojević, V., Čalija, S., Rietveld, G., Ačanski, M.V., Colangelo, D. Utilization of PMU Measurements for Three-Phase Line Parameter Estimation in Power Systems, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 67, No. 10, pp. 2453-2462, 2018. <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2843098>
- [5] Shi, D., Tylavsky, D.J., Koellner, K.M., Logic, N., Wheeler, D.E. Transmission line parameter identification using PMU measurements, European Transactions on Electrical Power. <https://doi.org/10.1002/etep.522>
- [6] Schweitzer, E.O., Zocholl, S.E. Introduction to symmetrical components, in Proc. *58th Annual Georgia Tech Protecting Relaying Conference*, Atlanta, GA, 2004. <https://selinc.com/api/download/2470> [pristupljeno 16.01.2025]
- [7] Kezunovic, M., Meliopoulos, S., Venkatasubramanian, S., Vittal, V. *Application of Time-Synchronized Measurements in Power System Transmission Networks*, Springer Cham, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06218-1>

AUTORI

Miljana Todorović - master inženjer elektrotehnike i računarstva, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, PowerGrid Engineering d.o.o. Beograd, miljana.todorovic@powergrid-e.com, ORCID [0000-0002-8821-4227](https://orcid.org/0000-0002-8821-4227)
dr Zoran Stojanović - redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, stojanovic@etf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0003-2432-394X](https://orcid.org/0000-0003-2432-394X)

Optimal Untransposed Transmission Line Parameter Estimation Using Synchrophasors

Abstract - The paper presents a method for estimating the parameters of an untransposed transmission line, which can be represented by an equivalent π -model, in real-time. The estimation of parameters is performed using the Weighted Least Squares (WLS) method, which utilizes three sets of synchronized phasor measurements of voltages and currents at both ends of the transmission line, with at least one measurement containing a sufficient zero-sequence voltage component. This method could be used in general case - for both transposed and untransposed lines, that have balanced or unbalanced load. By applying this method, it is possible to calculate the values of self-impedances and mutual impedances, as well as the values for susceptances. By transforming these values into the system of symmetrical components, the impedances and susceptances of positive, negative, and zero sequences, as well as mutual impedances between the positive, negative, and zero sequences, are also determined.

The parameters of the untransposed line were determined in two different cases. Voltage and current measurements at both end of the transmission line were generated using MATLAB Simulink software, where phasors were determined and later used as data input for the calculations. In the first idealized case, measurement errors were not considered, while in the second case, measurement error was modelled in the input data. In both cases, two methods were applied: the first one which estimates the unknown parameters of the untransposed line using equations for an untransposed transmission line, and the second one which estimates the unknown parameters based on equations for a transposed line.

Index terms - Untransposed transmission line parameter, Estimation theory, Synchrophasor, Measurements, WLS