

DOI: [10.46793/CIGRE37.B5.05](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.B5.05)**B5.05****RAZVOJ I LABORATORIJSKO TESTIRANJE APLIKACIJE ZA ESTIMACIJU
PARAMETARA DALEKOVODA NA OSNOVU SINHRFAZORSKIH MERENJA****DEVELOPMENT AND LABORATORY TESTING OF AN APPLICATION FOR
TRANSMISSION LINE PARAMETER ESTIMATION USING SYNCHROPHASOR
MEASUREMENTS****Miljana Todorović, Marko Medić, Marko Gostović***

Kratak sadržaj: U poslednjih desetak godina, sinhrofazorska merenja postala su široko primenjena u različitim aplikacijama za unapređenje rada elektroenergetskih sistema. Jedna od tih aplikacija omogućava estimaciju parametara dalekovoda u realnom vremenu, ali kako nije dostupna u komercijalnim softverskim paketima, aplikacija je razvijena i testirana u laboratoriji. Ova aplikacija omogućava estimaciju parametara dalekovoda direktnog redosleda - otpornosti, induktivnosti i kapacitivnosti. Pored toga, dodatni modul omogućava izračunavanje prosečne temperature voda, što bi u praktičnoj primeni doprinelo efikasnijem iskorišćenju kapaciteta prenosne mreže. Laboratorijsko testiranje aplikacije izvedeno je korišćenjem dva uređaja za merenje sinhrofazora, koji bi u stvarnim uslovima bili postavljeni na krajevima dalekovoda u transformatorskim stanicama. Pored njih, korišćeni su i uređaj za prikupljanje podataka u okviru koga je razvijen program za estimaciju parametara dalekovoda i temperature, GPS časovnik za preciznu sinhronizaciju vremena, Ethernet svič za povezivanje opreme, kao i platforma za testiranje uređaja u zatvorenoj petlji u realnom vremenu. Ova platforma uključuje digitalni simulator elektroenergetskog sistema u realnom vremenu i pojačavač signala, koji prilagođava izlazne napone i struje iz simulatora karakteristikama analognih ulaza uređaja za merenje sinhrofazora, a sam proces testiranja na ovaj način se uobičajeno zove RT-HIL testiranje (engl. Real-Time Hardware-In-the-Loop). Postupak verifikacije rada aplikacije, zajedno sa prikazom formiranih ekrana, detaljno je opisan u radu.

Ključne reči: aplikacija, estimacija parametara dalekovoda, estimacija temperature dalekovoda, sinhrofazorska merenja, RT-HIL

Abstract: Over the past decade, synchrophasor measurements have been widely used in various applications for improving power systems performance. One such application enables transmission line parameter estimation in real-time. However, since this functionality is not available in commercial software packages, a custom application has been developed and tested in a laboratory environment.

* Miljana Todorović, PowerGrid Engineering doo Beograd, miljana.todorovic@powergrid-e.com

Marko Medić, PowerGrid Engineering doo Beograd, marko.medic@powergrid-e.com

Marko Gostović, PowerGrid Engineering doo Beograd, marko.gostovic@powergrid-e.com

This application allows the estimation of positive-sequence transmission line parameters, including resistance, inductance, and capacitance. Additionally, an extra module enables the calculation of the average conductor temperature, that could contribute to a more efficient utilization of the transmission network's capacity. The laboratory testing of the application was conducted using two phasor measurement units (PMUs), which, in real-world conditions, would be installed in substations at both ends of the transmission line. Additionally, a phasor data concentrator (PDC) was used, which included a developed program for transmission line parameters and temperature estimation, then GPS clock for precise time synchronization, and ethernet switch. The testing platform included a real-time digital power system simulator and an amplifier, which adjusted output currents and voltages to match the characteristics of the phasor measurement units' analogue inputs. The application verification process using Real-Time Hardware-In-the-Loop testing platform, along with a display of available user interfaces, is described in detail in the paper.

Key words: *application, transmission line parameter estimation, transmission line temperature estimation, synchrophasor measurements, RT-HIL*

1 UVOD

Razvoj tehnologije sinhrofazorskih merenja je započet kasnih osamdesetih godina prošlog veka, dok su prve praktične primene otpočele neposredno posle toga, u ranim devedesetim godinama [1]. Njihov razvoj omogućio je značajan napredak u nadzoru i analizi elektroenergetskih sistema (EES). Ova tehnologija je našla široku primenu u različitim oblastima, kao što su detekcija oscilacija u EES-u, monitoring stabilnosti sistema, detekcija ostrvskog rada, praćenje brzine promene aktivne snage, upravljanje elektroenergetskim sistemom na širokim geografskim područjima (engl. *wide-area control*), upravljanje sistemom kroz RAS/SPS aplikacije (engl. *Remedial Action Schemes/Special Protection Schemes*), snimanje poremećaja, validacija modela sistema, estimacija stanja EES-a, estimacija parametara dalekovoda, ali i brojne druge, [1]-[5]. Sve ove primene omogućavaju poboljšanje efikasnosti, stabilnosti i sigurnosti elektroenergetskih sistema u realnom vremenu.

U ovom radu je detaljnije obrađena primena sinhrofazorskih merenja u estimaciji električnih parametara dalekovoda i temperature u realnom vremenu. Ova primena je od izuzetnog značaja za dobijanje preciznijih ulaznih podataka, a kasnije i preciznijih rezultata u različitim vrstama proračuna i simulacija elektroenergetskih sistema, kao što su analize tranzijentne stabilnosti, proračuni tokova snaga, analize kratkih spojeva, estimacija stanja mreže, kao i za precizno podešavanje distantnih zaštita i tačnu identifikaciju lokacije kvara. Konvencionalno se parametri prenosnih vodova proračunavaju na osnovu konfiguracije stubova i fizičkih osobina provodnika, ali i parametara koje je neophodno aproksimirati, kao što je na primer otpor tla, pa iako praktičan, ovaj pristup unosi određene greške prilikom proračuna. Dodatno, na osnovu estimacije temperature dalekovoda, moguće je u realnom vremenu korigovati maksimalno dozvoljeno opterećenje dalekovoda čime bi se povećala efikasnost upravljanja elektroenergetskim sistemom.

U okviru rada, predstavljena je razvijena aplikacija za estimaciju električnih parametara dalekovoda (otpornosti, induktivnosti i kapacitivnosti) i temperature u realnom vremenu, testirana u laboratorijskim uslovima. Dalekovod je modelovan unutar digitalnog simulatora elektroenergetskog sistema, dok je ostala oprema korišćena u skladu sa uslovima koji bi vladali u realnim okolnostima. U konkretnom slučaju, izabran je model dalekovoda sa skoncentrisanim parametrima, koji je najčešće korišćen u literaturi.

Iako je ovaj model najčešće razmatran, postoje radovi koji se bave složenijim modelima, poput modela vodova sa raspodeljenim parametrima [6], ili modeli netransponovanih vodova [7], koji mogu dati preciznije rezultate estimacije u zavisnosti od karakteristika realnog dalekovoda za koji bi se vršile pomenute estimacije u realnom vremenu.

2 TEHNOLOGIJA SINHROFAZORSKIH MERENJA

Sinhrofazori predstavljaju vremenski sinhronizovana merenja veličina koje se mogu opisati fazorima, dok fazore definišemo kao kompleksne veličine koje predstavljaju amplitudu i fazni ugao sinusoidalnog oblika napona i struja u određenom trenutku u vremenu. Prema IEEE standardu 60255-118-1 [8], definisan je referentni vektor koji je sinhronizovan prema UTC vremenu, a na početku svake sekunde uzima vrednost 1. U odnosu na ovaj referentni vektor, određuju se fazni uglovi merenih sinhrofazora, što omogućava da merenja sa različitih lokacija budu vremenski sinhronizovana.

Sinhrofazorska merenja, odnosno vremenski sinhronizovana merenja električnih veličina u elektroenergetskom sistemu, omogućena su primenom uređaja poznatih kao PMU uređaji (engl. *Phasor Measurement Unit*). U poređenju sa široko korišćenom SCADA tehnologijom za nadzor i upravljanje, sinhrofazorska tehnologija donosi brojne prednosti. Dok SCADA sistem pruža merenja efektivnih vrednosti napona i struja, kao i aktivne i reaktivne snage, PMU uređaji omogućavaju merenje sinhronizovanih fazora napona i struja, frekvencije, brzine promene frekvencije (ROCOF), kao i pomenutih snaga. Još jedna značajna prednost PMU tehnologije je njena visoka vremenska rezolucija, koja obično iznosi između 30 i 60 merenja u sekundi, dok SCADA sistemi podatke ažuriraju tipično na svakih 4 do 6 sekundi.

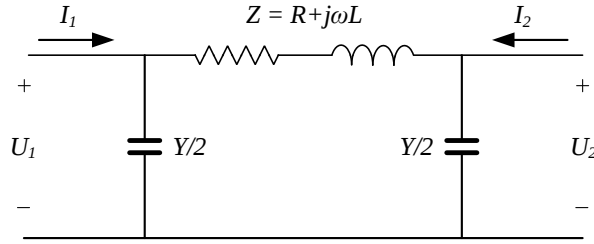
Sinhrofazorska merenja su vremenski sinhronizovana sa tačnošću do jedne mikrosekunde zahvaljujući vremenskoj sinhronizaciji putem GPS signala. Zbog toga su merenja sa različitih lokacija precizno usklađena u vremenu i mogu se međusobno porediti, što omogućava direktno izračunavanje razlike faznih uglova između različitih tačaka u mreži. Na ovaj način, a uz visoku vremensku rezoluciju sinhrofazorskih merenja, omogućen je precizan uvid u sveobuhvatno stanje sistema, omogućavajući brzo otkrivanje pojava kao što su oscilacije i nestabilnosti napona, koje SCADA sistem nije u mogućnosti da detektuje. Kompleksne komunikacione mreže, zajedno sa naprednim analitičkim alatima i softverskim aplikacijama, omogućavaju da se podaci sa PMU uređaja pretvore u vredne informacije koje se koriste za svakodnevno upravljanje sistemom, ali i za dugoročno planiranje razvoja elektroenergetskog sistema [9].

3 MODEL ZA ESTIMACIJU PARAMETARA DALEKOVODA I TEMPERATURE

3.1 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 oba kraja voda:

$$\underline{Z} = \frac{U_1^2 - U_2^2}{I_1 \cdot U_2 - I_2 \cdot U_1} \quad (1)$$

$$\underline{Y} = 2 \cdot \frac{I_1 + I_2}{U_2 + U_1} \quad (2)$$

Otpornost i induktivnost voda se potom određuju na osnovu sledeće jednačine:

$$R = \operatorname{Re}\{\underline{Z}\}, L = \frac{\operatorname{Im}\{\underline{Z}\}}{2\pi f} \quad (3)$$

dok se kapacitivnost voda izračunava kao:

$$C = \frac{\operatorname{Im}\{\underline{Y}\}}{2\pi f} \quad (4)$$

3.2 Estimacija temperature voda

Zavisnost otpornosti voda od temperature voda se usvaja da je praktično linearna i predstavlja se na sledeći način:

$$R = R_{ref} \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_{ref})) \quad (5)$$

gde su:

R – otpornost provodnika pri temperaturi T u Ω ;

R_{ref} – otpornost provodnika pri referentnoj temperaturi T_{ref} (najčešće se usvaja da je referentna temperatura 20°C) u Ω ;

α – temperaturni koeficijent električnog otpora za određeni materijal provodnika;

T – temperatura provodnika u $^\circ\text{C}$;

T_{ref} – referentna temperatura pri kojoj se definiše α za određeni materijal provodnika;

Ukoliko je poznata referentna otpornost provodnika, a na osnovu jednačine (5), se izračunava estimacija trenutne temperature provodnika:

$$T_{est} = T_{ref} + (R_{est}/R_{ref} - 1)/\alpha \quad (6)$$

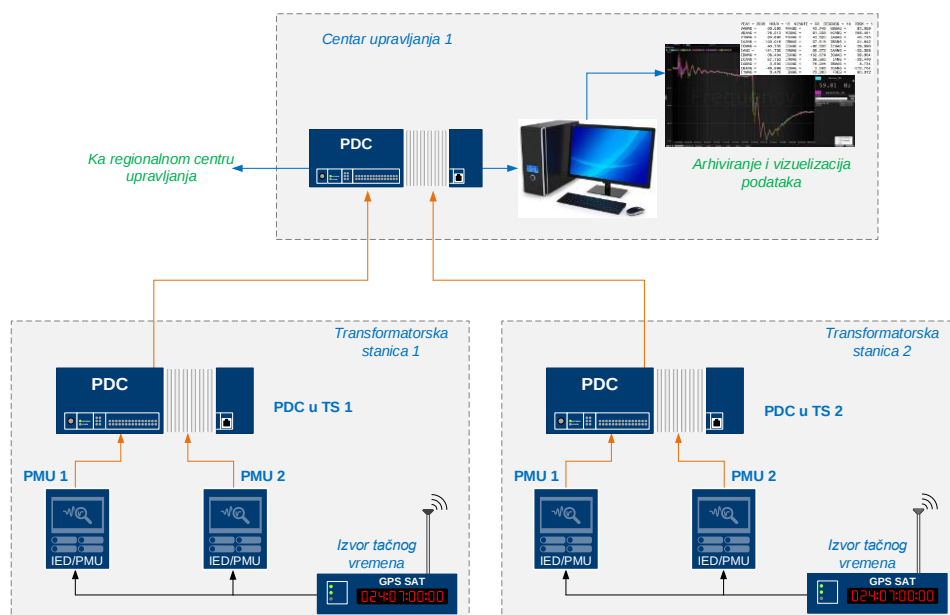
gde je R_{est} estimirana trenutna vrednosti otpornosti voda na osnovu sinhrofazorskih merenja.

4 REALIZACIJA SISTEMA ZA TESTIRANJE RAZVIJENE APLIKACIJE

4.1 Komponente sistema za sinhrofazorska merenja

Kako bi se formirao adekvatan i u potpunosti funkcionalan sistem za sinhrofazorska merenja, neophodno je obezbediti sledeće ključne elemente sistema, prikazane na slici 2:

- Izvor tačnog vremena
- Uređaje za sinhrofazorska merenja – PMU
- Uređaje za prikupljanje sinhrofazorskih podataka – PDC (engl. *Phasor Data Concentrator*)
- Sisteme za skladištenje i analizu podataka
- Korisnički interfejs i alate za vizualizaciju
- Mrežnu infrastrukturu i komunikacioni interfejs



Slika 2: Osnovne komponente sistema za sinhrofazorska merenja

Izvor tačnog vremena (GPS sat) predstavlja ključnu komponentu sistema za sinhrofazorska merenja. Precizan časovnik je bio direktan preduslov za realizaciju sinhrofazorskih merenja, jer omogućava vremensku sinhronizaciju podataka sa različitih lokacija. Bez ove komponente, podaci ne bi mogli biti vremenski usklađeni, što bi onemogućilo njihovu upotrebu i poređenje. Prema standardima IEEE/IEC, izvor tačnog vremena mora imati tačnost od ± 500 ns i biti kompatibilan sa standardima koji se odnose na sinhrono merenje vremena. GPS sat može biti nezavistan uređaj koji sinhronizuje više PMU uređaja istovremeno ili može biti integrisan u PMU uređaj.

Uređaji za sinhrofazorska merenja (PMU uređaji) su inteligentni elektronski uređaji (engl. *Intelligent Electronic Device* – IED) instalirani u različitim tačkama EES-a, koji imaju mogućnost merenja fazora struja i napona (amplitude i faznog stava) i predstavljaju osnovu svakog sinhrofazorskog sistema.

Podaci dobijeni od PMU uređaja moraju biti visokoprecizni, vremenski usaglašeni i koordinisani. Uređaji za sinhrofazorska merenja mogu biti realizovani kao samostalni uređaji ili kao funkcija unutar mikroprocesorskih zaštitnih uređaja, povezani na sekundarna kola naponskih i strujnih transformatora (bilo na zaštitna bilo na merna jezgra, poželjno je po mogućstvu i na oba). Ovi uređaji vrše monitoring amplituda i uglova napona i struja, kao i učestanosti i brzine promene učestanosti elektroenergetskog sistema.

Uređaji za prikupljanje podataka (PDC uređaji) predstavljaju centralnu tačku sistema za sinhrofazorska merenja. Osim osnovne funkcije prikupljanja podataka, PDC uređaji takođe mogu obavljati konverziju različitih komunikacionih protokola. Svaki paket sinhrofazorskih podataka koji dolazi od PMU uređaja sadrži vremensku referencu dobijenu od visokopreciznog izvora vremena (GPS sat). PDC uređaji agregiraju vremenski sinhronizovana merenja sa različitih PMU uređaja (ili drugih PDC jedinica) u koherentan skup podataka, koji može biti analiziran u realnom vremenu ili kasnije, ali i prosleđuju ove informacije nadređenom centru upravljanja ili drugim aplikacijama. Takođe, PDC uređaji pomažu u upravljanju velikom količinom podataka, obezbeđujući da se prosleđuju samo relevantni, filtrirani podaci.

Kako bi se bolje razumela potreba za postojanjem PDC uređaja, razmotrićemo situaciju u kojoj se PMU 1 nalazi na istoj lokaciji kao i PDC uređaj, dok je PMU 2 uređaj smešten na udaljenoj lokaciji (u pitanju mogu biti i stotine kilometara). Vreme potrebno da paket podataka od PMU 1 stigne do PDC uređaja biće značajno kraće nego vreme potrebno za paket podataka od PMU 2. Ključna uloga PDC uređaja je da prikupi pristigle pakete od svih PMU uređaja u sistemu i složi ih prema vremenima u kojima su podaci registrovani. Ovaj „superpaket“ omogućava precizno poređenje podataka dobijenih iz različitih delova elektroenergetskog sistema.

Sistemi za skladištenje i analizu podataka omogućavaju čuvanje prikupljenih podataka radi obrade u realnom vremenu ali i zarad istorijske obrade. Ovi sistemi obezbeđuju računarske kapacitete i algoritme neophodne za analizu stanja elektroenergetske mreže, detekciju poremećaja i generisanje korisnih informacija za operatere.

Korisnički interfejs i alati za vizualizaciju predstavljaju softversko okruženje za prikaz objedinjenih podataka u pristupačnom formatu za operatere. Operateri mogu koristiti različite vrste kontrolnih prikaza, grafičke prikaze i alarme za praćenje stanja mreže u realnom vremenu i brzo donošenje odluka.

Mrežna infrastruktura i komunikacioni interfejs predstavljaju ključne komponente u funkcionisanju sinhrofazorskog sistema merenja, jer omogućavaju prenos podataka od pojedinačnih PMU uređaja do centralnog PDC uređaja. Ova infrastruktura mora da obezbedi pouzdan prenos podataka sa minimalnim kašnjenjem između PMU uređaja, PDC jedinica i kontrolnog centra. Brza i robusna mrežna infrastruktura je od suštinskog značaja za efikasno praćenje prenosa podataka u realnom vremenu i očuvanje integriteta podataka. Propusna moć komunikacionog podsistema direktno utiče na količinu i učestanost prenosa podataka, što ima direktan uticaj na ukupnu efikasnost i pouzdanost sinhrofazorskog sistema. Komunikacija može biti ostvarena različitim tehnologijama, uključujući direktne optičke veze, radio veze, modeme, Ethernet ili Internet, u zavisnosti od specifičnih zahteva sistema i dostupne infrastrukture.

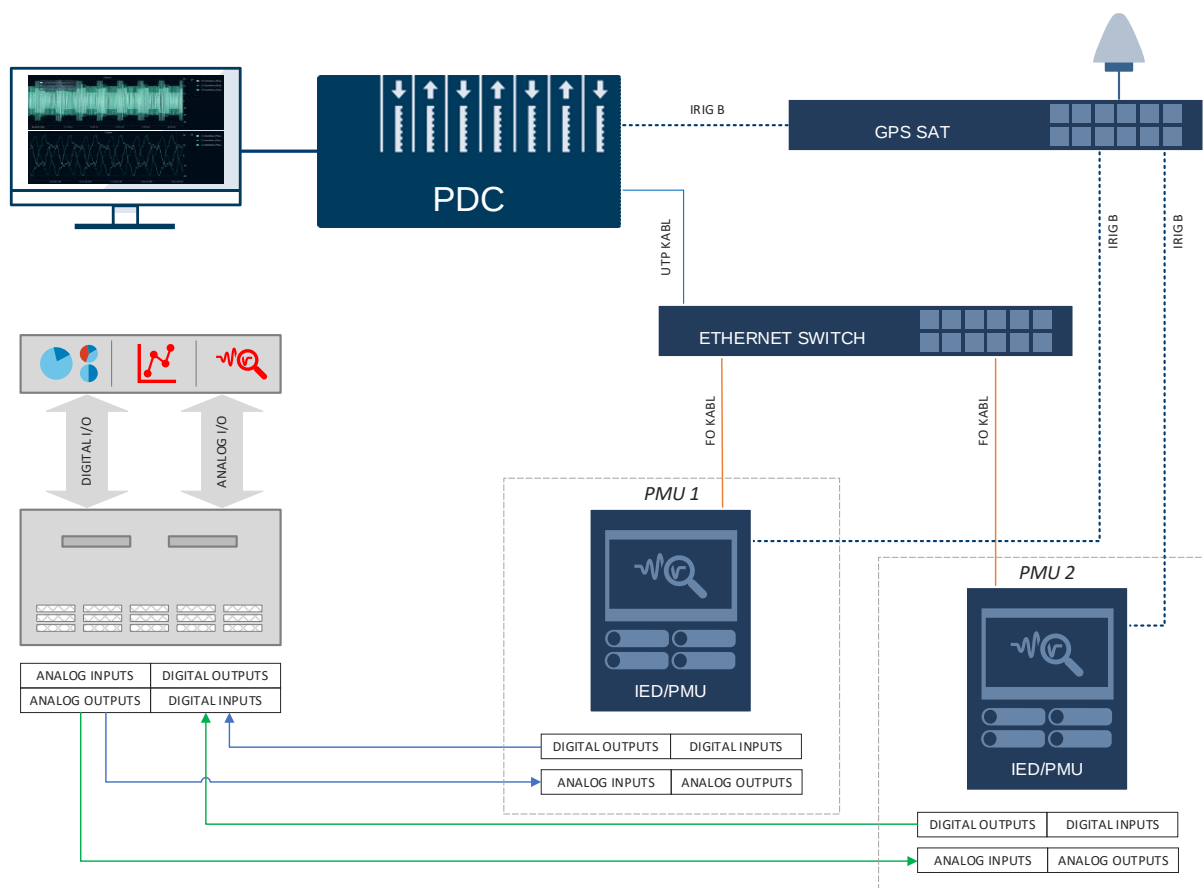
4.2 Opis sistema za testiranje aplikacije za estimaciju parametara dalekovoda

Za generisanje merenja napona i struja sa oba kraja voda, u cilju testiranja razvijene aplikacije za estimaciju parametara vodova, primenjena je RT-HIL (engl. *Real-Time Hardware-in-the-Loop*) metoda testiranja.

U tu svrhu korišćena su dva uređaja: digitalni simulator elektroenergetskog sistema u realnom vremenu i pojačavač signala, koji omogućava prilagođavanje izlaza iz simulatora analognim ulazima uređaja za sinhrofazorska merenja. Pored HIL opreme, korišćena su i dva IED uređaja u funkciji PMU uređaja, GPS sat za distribuciju tačnog vremena putem IRIG-B signala, kao i kontroler za automatizaciju u realnom vremenu (engl. *Real-Time Automation Controller* – RTAC), koji je služio kao PDC uređaj za prikupljanje sinhrofazorskih merenja. Uređaji su međusobno povezani putem upravljivog Ethernet sviča.

Aplikacija za estimaciju parametara vodova razvijena je korišćenjem IEC 61131 programabilne logike, koja je integrisana u PDC uređaj. Grafički prikaz rezultata estimacije ostvaren je korišćenjem web-baziranog HMI (engl. *Human Machine Interface*) sistema, koji je takođe sastavni deo PDC uređaja.

Blok-šema sistema korišćenog za testiranje aplikacije za estimaciju parametara dalekovoda i temperature u realnom vremenu, zasnovane na sinhrofazorskim merenjima, prikazana je na slici 3, dok je laboratorijska postavka testiranja prikazana na slici 4.



Slika 3: Blok šema realizovanog sistema za testiranje aplikacije za estimaciju parametara dalekovoda

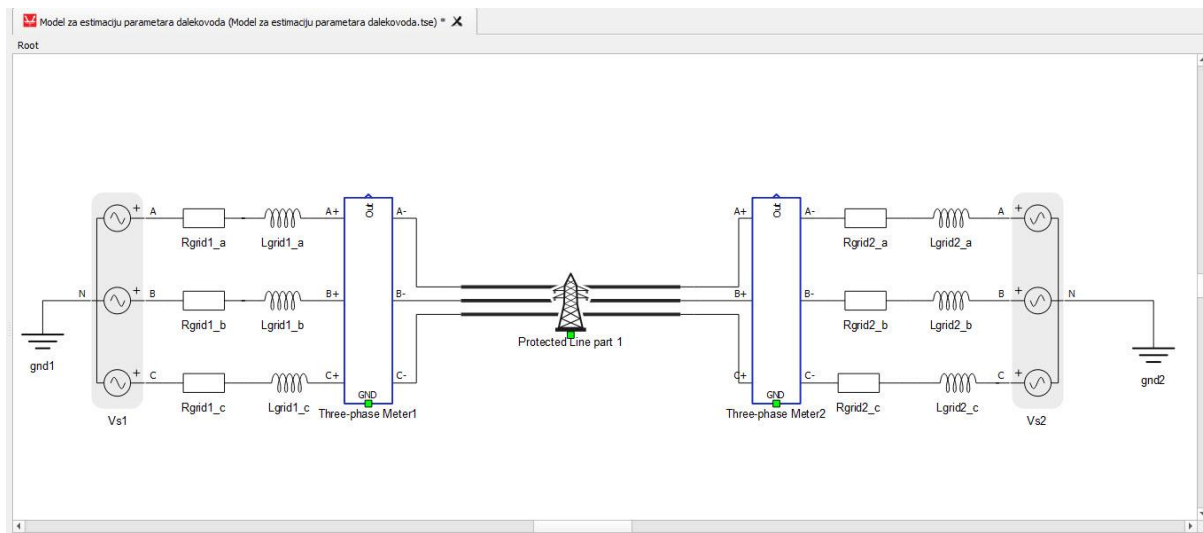


Slika 4: Laboratorijska postavka ispitivanja: **1.** SEL-787L zaštitni uređaj - PMU 1, **2.** SEL-787L zaštitni uređaj - PMU 2, **3.** Typhoon HIL 604, **4.** HIL Connect, **5.** SEL-2488 GPS sat, **6.** SEL-2730 Ethernet svič

5 TESTIRANJE APLIKACIJE I REZULTATI

5.1 Formiranje modela mreže

Kako bi se testirala aplikacija za estimaciju parametara dalekovoda pomoću sinhrofazorskih merenja, u okviru digitalnog simulatora sistema u realnom vremenu je razvijen matematički model dela EES-a, kao što je prikazano na slici 5. Dalekovod u modelu je modelovan pomoću zamenske π -šeme, sledećih parametara direktnog redosleda: $R=0,12 \Omega/\text{km}$ (na temperaturi od 20°C), $L=1,305 \text{ mH}/\text{km}$ i $C=10 \text{ nF}/\text{km}$. Dalekovod je povezan na 110 kV naponsku mrežu, nominalne učestanosti 50 Hz, a njegova dužina iznosi 50 km.



Slika 5: Matematički model dalekovoda i ekvivalenata EES-a sa oba kraja dalekovoda

5.2 Rezultati testiranja

Na osnovu sinhrofazorskih merenja struja i napona sa PMU uređaja, generisanih korišćenjem digitalnog simulatora elektroenergetskog sistema u realnom vremenu i dodatno prilagođenih pomoću uređaja za pojačavanje signala, a koji odgovaraju merenjima na oba kraja posmatranog dalekovoda, u okviru PDC uređaja su u realnom vremenu estimirane vrednosti parametara dalekovoda direktnog redosleda – otpornost (R), reaktansa (X) i susceptansa (B). Rezultati estimacije prikazani su na slikama 6, 7 i 8. Na njima su, pored procenjenih vrednosti, prikazane i referentne vrednosti koje su zadate u modelu ($R = 6 \Omega$, $X = 20,5 \Omega$, $B = 157 \mu S$), i granice koje označavaju odstupanja od $\pm 1\%$ u slučaju estimacije otpornosti i reaktanse, odnosno $\pm 10\%$ u slučaju estimacije susceptanse.

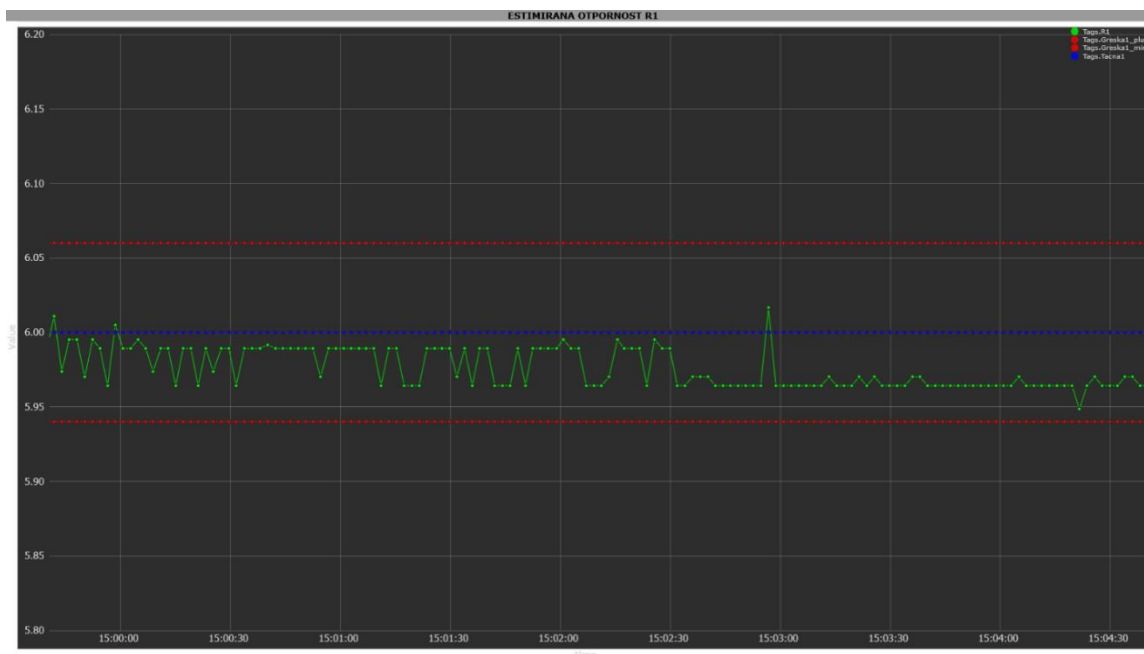
Sa slika 6 i 7 se može uočiti da su estimirane vrednosti parametara R i X unutar označenih granica odstupanja od $\pm 1\%$. S druge strane, estimacija parametra B pokazuje nešto veću grešku, što je očekivano imajući u vidu njegovu malu vrednost i samim tim veću osetljivost na promene u ulaznim veličinama za proračun, odnosno sinhrofazorskim merenjima napona i struja. Sa slike 8 vidimo da su odstupanja estimirane vrednosti susceptanse u okviru granica odstupanja $\pm 10\%$ u odnosu na zadatu vrednost parametra.

Važno je napomenuti da odstupanja u estimaciji parametara uglavnom potiču od grešaka u sistemu za generisanje ulaznih signala (posebno pojačavača), kao i grešaka estimacije fazora samih PMU uređaja. Ipak, uticaj pojedinačnih izvora grešaka na konačne rezultate nije detaljnije razmatran u okviru ovog rada. U realnim primenama, na tačnost estimacije bi, pored grešaka koje unose PMU uređaji, uticale i greške strujnih i naponskih mernih transformatora, kao i odstupanja usled razlika između idealizovanog matematičkog i stvarnog fizičkog modela dalekovoda.

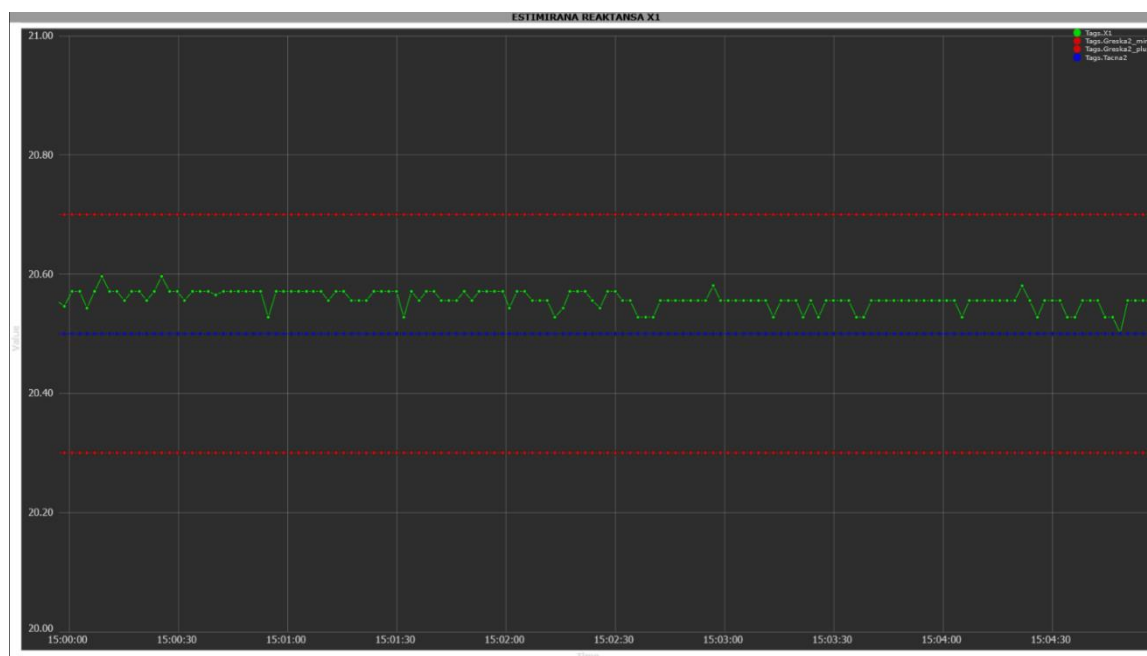
Dodatno, pored estimacije parametara dalekovoda, u okviru PDC uređaja implementiran je i proračun temperature provodnika, zasnovan na estimiranoj vrednosti otpornosti voda, prema zavisnosti definisanoj u jednačini (6). S obzirom na to da je odnos između temperature i otpornosti linearan, tačnost estimacije otpornosti direktno utiče na tačnost procene temperature.

Za potrebe jednostavnog testa, otpornost dalekovoda je zadata tako da odgovara otpornosti pri temperaturi provodnika od $70,0^\circ C$.

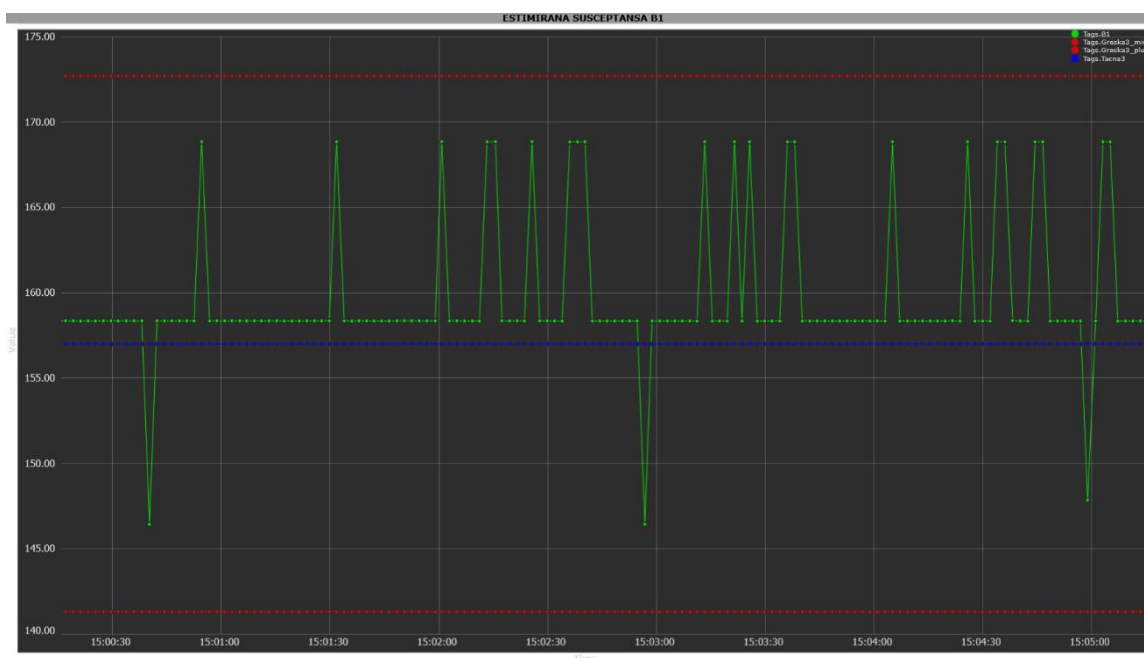
Na slici 9 prikazan je deo korisničkog interfejsa PDC uređaja, koji u jednom od trenutaka prikazuje estimiranu temperaturu provodnika od 70,9°C. Softver omogućava estimaciju temperature u realnom vremenu, što u praktičnoj primeni može imati značajnu ulogu u dinamičkom određivanju maksimalno dozvoljenog opterećenja dalekovoda, čime bi bilo omogućeno efikasnije iskorišćenje njegovog kapaciteta.



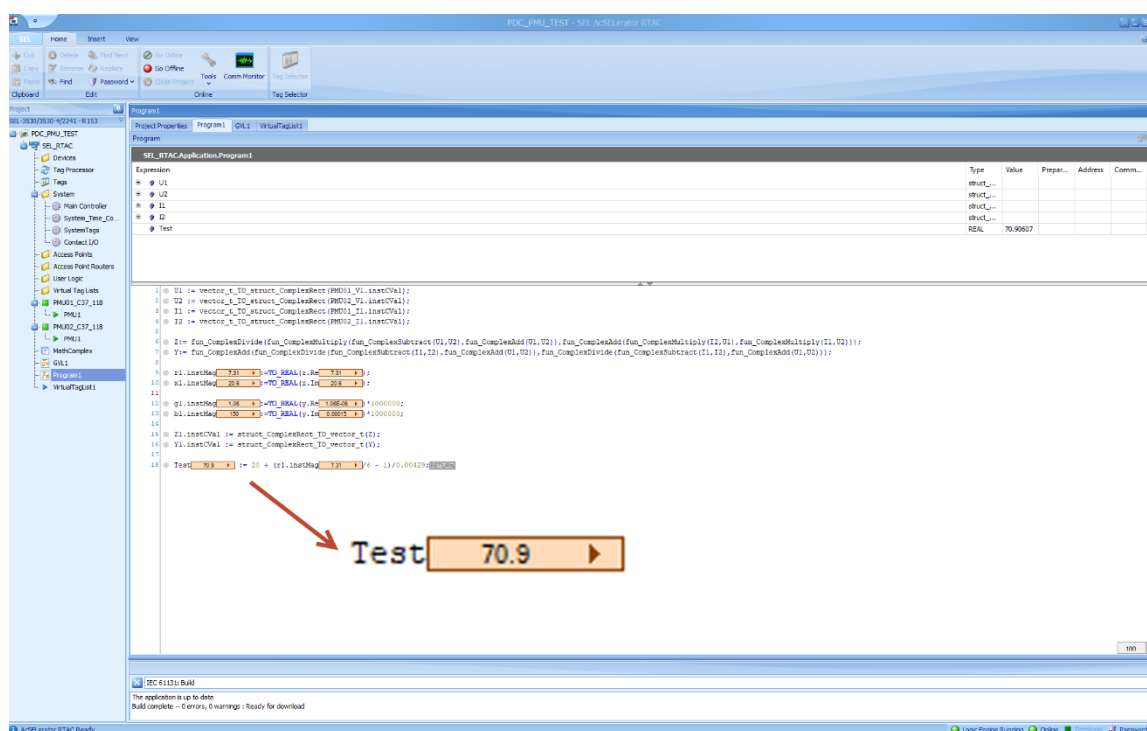
Slika 6: Estimacija otpornosti dalekovoda direktnog redosleda u realnom vremenu sa označenom referentnom vrednošću $R = 6 \Omega$ i granicama odstupanja $\pm 1\%$



Slika 7: Estimacija reaktanse dalekovoda direktnog redosleda u realnom vremenu sa označenom referentnom vrednošću $X = 20,5 \Omega$ i granicama odstupanja $\pm 1\%$



Slika 8: Estimacija susceptanse B dalekovoda direktnog redosleda u realnom vremenu sa označenom referentnom vrednošću $B = 157 \mu\text{S}$ i granicama odstupanja $\pm 10\%$



Slika 9: Estimacija temperature provodnika ($T_{\text{zad}}=70$ stepeni)

6 ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljena je razvijena aplikacija za estimaciju parametara dalekovoda i temperature u realnom vremenu zasnovana na sinhrofazorskim merenjima, kao i rezultati njene verifikacije u HIL okruženju. Iako implementacija razvijene aplikacije nudi brojne prednosti, određeni izazovi ostaju prisutni, kao što su vrednost početne investicije u slučaju potrebe za potpunom realizacijom sinhrofazorskog sistema merenja, zavisnost od GPS signala i zahtev za

visokom stručnošću u obradi i analizi podataka, s obzirom da bi u realnim uslovima ulazna merenja bila opterećena većim prisustvom grešaka, te je stoga primena adekvatnih metoda za obradu i optimizaciju podataka od suštinskog značaja.

Ipak, sa sve većim brojem instaliranih PMU uređaja u elektroenergetskim sistemima, kao i uz kontinuirani napredak u razvoju analitičkih alata, može se očekivati šira i intenzivnija primena ovakvih metoda u praksi, što će doprineti pouzdanijem, preciznijem i efikasnijem upravljanju elektroenergetskim sistemima u budućnosti, kao i povećanju tačnosti analiza koje se oslanjaju na modele dalekovoda.

7 LITERATURA

- [1] Mladen Kezunovic, Sakis Meliopoulos, Vaithianathan Venkatasubramanian, Vijay Vittal, "Application of time-synchronized measurements in power system transmission networks", Springer, 2014
- [2] Edmund O. Schweitzer III, David Whitehead, Greg Zweigle, Krishnanjan Gubba Ravikumar, and Greg Rzepka, "Synchrophasor-Based Power System Protection and Control Applications", Originally presented at the 36th Annual Western Protective Relay Conference, October 2009
- [3] Husam Ahmed, "Catch the Next Dynamic Wave: Overview and References of Wide Area Monitoring Systems and Remedial Action Scheme (RAS) Solutions", Presented at the GCC Power 2022 Conference & Exhibition, Riyadh, Saudi Arabia, 2022
- [4] F. Iliceto, Ö. Akansel, M. Akdeniz, S. Erikci, Y. Z. Korkmaz and K. G. Ravikumar, "System Integrity Protection Schemes in the 400 kV Transmission Network of Turkey," in 7th International Conference on Power System Protection and Automation, New Delhi, 2018
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Di Shi, Daniel J. Tylavsky, Kristian M. Koellner, Naim Logic, David E. Wheeler, "Transmission line parameter identification using PMU measurements", European Transactions on Electrical Power, doi.org/10.1002/etep.522
- [8] IEEE/IEC International Standard - Measuring relays and protection equipment - Part 118-1: Synchrophasor for power systems – Measurements, IEEE/IEC 60255-118-1-2018
- [9] Philip Overholt, Kjetil Uhlen, Brian Marchionini and Olivia Valentine, Synchrophasor Applications for Wide Area Monitoring and Control, ISEAN Discussion Paper