

Analiza referenčnih algoritmov za izračun PMU-parametrov

Miha Kokalj, Rado Lapuh, Boštjan Voljč, Borut Pinter, Matjaž Lindič, Zoran Svetik

Slovenski inštitut za kakovost in meroslovje (SIQ), Tržaška cesta 2, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: miha.kokalj@siq.si

Povzetek. Za nadzor pametnih omrežij se uporabljajo PMU-merilniki, ki vzorčijo signale na elektroenergetskem omrežju. Na podlagi zajetih vzorcev se z internimi algoritmi določijo PMU-parametri, ki se v nadaljevanju uporabljajo za nadzor omrežja. Za zagotavljanje sledljivosti PMU-merilnikov je treba zagotoviti verifikacijo internih algoritmov, kar je predstavljeno v tem prispevku.

Ključne besede: pametna omrežja, PMU-merilnik, algoritmi, standard, analiza

Analysis of reference algorithms to calculate PMU parameters

The paper analyzes various reference algorithms to calculate PMU (Phasor Measurement Unit) parameters used for calibration purposes. Power signals on the power grid are measured with PMU which samples the electric waves on power grid, using a common source for time synchronization enabling synchronization of the real-time measurements of multiple remote measurement points on the grid. In power engineering, these points are commonly referred to as synchrophasors and are considered to be one of the most important measuring devices of the future power systems allowing real-time monitoring of power transmission lines. Real-time monitoring enables automatic control or recovery of power transmission lines in case of their failure or severe malfunctioning.

The paper presents results of our work on a Smart Grid project coordinated by European Metrology Research Programme (EMRP). In the first stage of the project an improved algorithm was developed and in the second stage various algorithms were analyzed compliably with the standardized tests [4].

1 UVOD

PMU (»Phasor Measurement Unit«) je naprava, ki se v elektroenergetskem sistemu uporablja za merjenje frekvence, amplitude napetosti in toka ter faznega kota med njima ob znanih časovnih intervalih. Posamezne PMU-naprave se uporabljajo v pametnem omrežju (Smart Grid), kjer se njihovi podatki uporabljajo za regulacijo ter spremljanje stabilnosti in kakovosti elektroenergetskega omrežja.

V članku so predstavljeni rezultati analize različnih referenčnih algoritmov za izračun PMU-parametrov, ki se uporabljajo za kalibracijo PMU-naprav. Članek

predstavlja nadaljnje delo pri projektu »Smart Grid«, ki se izvaja v sklopu programa EMRP.

Pobuda za evropski projekt »Smart Grid« je nastala zaradi uvajanja alternativnih virov električne energije, ki se v današnjem času množično vključujejo v elektroenergetske sisteme. Klasični regulacijski sistemi niso več kos novim energetskim tehnologijam. Razne študije in praksa so pokazale, da alternativni viri energije povzročajo nestabilnosti v omrežju, ki jih z dosedanjjo regulacijsko tehnologijo niti ni mogoče zaznati, kaj šele upravljati. Alternativni viri energije so postali dejstvo, zato je treba proučiti in razviti nove tehnologije, ki bodo kos sodobnim kompleksnim elektroenergetskim sistemom. Zaradi velikih meroslovnih izzivov se je oblikoval projekt »Smart Grid«, pri katerem sodelujejo nacionalni meroslovniki inštituti, fakultete in elektroenergetska podjetja. Projekt je bil razdeljen na štiri glavne naloge.

Prva naloga je bila izdelati matematični model sodobnega elektroenergetskega omrežja in ugotoviti, kateri so glavni dejavniki, ki povzročajo nestabilnost in električne izpade.

Druga naloga je bila izdelati in analizirati PMU-merilnik. Pri tej nalogi je sodelovala raziskovalna ekipa SIQ, katere naloga je bila analizirati in razviti referenčne algoritme, potrebne za kalibracijo PMU-merilnika. Ta del je podrobneje predstavljen v tem prispevku.

Tretja naloga je bilo ugotavljanje kakovosti distribuirane električne energije na terenu. Omrežni signal namreč vsebuje več nečistosti, kot so napetostna nihanja, harmonska popačenja in druge motnje. Kakovost se je testirala na vetrnih elektrarnah, razdelilnih postajah in podpostajah. Rezultati testiranja bodo uporabljeni za bodoče normative in standarde za omrežni električni signal.

Predmet četrte naloge je bilo merjenje električne energije. Energetska liberalizacija in vključitev manjših lokalnih proizvajalcev električne energije v elektroenergetski sistem prinaša izzive tudi na področju obračunavanja. Cilj te naloge je bil proučiti in zagotoviti pravično obračunavanje. Pri tem je treba ugotoviti, ali se energija porablja ali generira (dvosmerni sistemi), jo pravilno izmeriti, zagotoviti kalibracijo števca električne energije na daljavo itd.

Parametri PMU se merijo na različnih točkah prenosnega omrežja in delujejo sinhrono. V praksi to pomeni, da so vsi merilniki na prenosnih vodih vezani na isto časovno referenco GPS. Merilni sistem torej deluje v realnem času, kar omogoča hitro regulacijo in avtomatizacijo. Omrežja prihodnosti bodo namreč še kompleksnejša, tok energije ne bo več tekkel le v eno smer, ampak v obe. Klasični elektroenergetski sistem je zasnovan okoli velike centralne enote, kjer se proizvaja energija in se od tam naprej pošilja v omrežje. V tem primeru teče tok energije samo v eno smer. Regulacija klasičnega omrežja se izvaja v velikih centralnih enotah. Omrežja prihodnosti delujejo tako, da se energija proizvaja in aktivno distribuira v več smereh. Vključitev različnih virov energije na različnih lokacijah prinese kompleksno regulacijo, ki ne more biti več centralna, temveč se mora izvajati aktivno. V tem primeru je treba v določenem trenutku poznati dogajanje na celotnem omrežju, imeti potrebne regulacijske mehanizme, da sistem deluje pravilno, učinkovito in stabilno.

Merilniki PMU sinhrono vzorčijo signale na elektroenergetskem omrežju in iz teh vzorcev izračunavajo PMU-parametre. Izračuni se delajo z uporabo matematičnih algoritmov. Z različnimi algoritmi lahko dobimo različne rezultate.

V tem prispevku so predstavljeni rezultati analize različnih algoritmov za izračun PMU-parametrov. Testi so izvedeni po standardiziranih postopkih, ki so pojasnjeni v nadaljevanju. Na podlagi rezultatov analize je predstavljen izbirni diagram, ki pove, kateri algoritem je najprimernejši za kalibracijo posameznega definirane standardiziranega testa.

2 STANDARD PMU

Zahteve, ki jih morajo dosegati merilniki PMU, so opisane v standardu »IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems«. Standard opisuje problematiko PMU-meritev, definira PMU-parametre, predpisuje teste za kalibracijo PMU-merilnikov, vendar ne predpisuje postopka, po katerem morajo biti ti testi izvedeni.

Ta standard se je začel razvijati že leta 1995. Danes aktualna različica izhaja iz leta 2011. Skozi razvoj standarda so se definirali teorija in PMU-parametri, ki so jasno opisani in podprti z matematično in opisno razlago. V prilogi standarda so podani testi za verifikacijo PMU-merilnikov s podanimi mejnimi vrednostmi. Nekaj standardnih testov je predstavljenih tudi v tem prispevku.

3 DEFINICIJA PMU-PARAMETROV

Teoretične vrednosti sinhrofazorjev in vrednosti, pridobljene na podlagi izračuna vzorcev, se lahko razlikujejo. Razlike nastanejo zaradi vzorčenja kompleksnega signala na liniji in zaradi izračuna na teh vzorcih, ki temelji na uporabljenem algoritmu. Razlike med teoretičnim in izračunanim sinhrofazorjem se predstavijo s PMU-parametrom *TVE* (Total Vector Error), ki je določen:

$$TVE = \sqrt{\frac{(X_r(n) - X_r)^2 + (X_i(n) - X_i)^2}{X_r^2 + X_i^2}} \quad (1)$$

kjer je

$$\begin{array}{ll} X_r(n), X_i(n) & - \text{izračunan vektor v času } n, \\ X_r, X_i & - \text{idealni PMU vektor.} \end{array}$$

TVE nosi informacijo o fazi in magnitudi. Če želimo vedeti, kaj se dogaja s fazo (ψ), moramo določiti še fazno napako *PE* (Phase Error), ki je določen z enačbo

$$PE = |\psi(t)_{\text{teoretično}} - \psi(n)_{\text{izmerjeno}}| \quad (2)$$

Najnovejši standard poleg statičnih razmer na električnem omrežju vključuje tudi meritve v dinamičnih razmerah. Tipičen primer dinamičnih razmer na omrežju je sunkovita sprememba frekvence. Za njeno ovrednotenje je bil v standardu definiran parameter *ROCOF* (Rate Of Change Of Frequency). Osnova za njegovo določitev je enačba za signal na liniji:

Signal na liniji $x(t)$:

$$x(t) = X_m \cos[\psi(t)] \quad (3)$$

in enačba za definicijo frekvence $f(t)$:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\psi(t)}{dt} \quad (4)$$

ROCOF je definiran kot drugi odvod faze oz. kot odvod frekvence, torej:

$$ROCOF = \frac{df(t)}{dt} \quad (5)$$

Sinhrofazorji se računajo glede na nominalno frekvenco. Če je argument v kosinusni funkciji predstavljen kot

$$(t) = \omega_0 t + \varphi(t) = 2\pi f_0 t + \varphi(t) = 2\pi \left[f_0 t + \frac{\varphi(t)}{2\pi} \right], \quad (6)$$

potem enačbo za frekvenco lahko zapišemo kot:

$$f(t) = f_0 + \frac{d \left[\frac{\varphi(t)}{2\pi} \right]}{dt} = f_0 + \Delta f(t) \quad (7)$$

kjer je

$\Delta f(t)$ - odstopanje frekvence od nominalne frekvence.

Na podlagi zgornjih enačb lahko definiramo *ROCOF* kot odvod odstopanja frekvence od nominalne frekvence:

$$\frac{d^2 \left[\frac{\varphi(t)}{2\pi} \right]}{dt^2} = \frac{d(\Delta f(t))}{dt} \quad (8)$$

Podobno kot velja za *TVE*, lahko primerjamo tudi idealni in izračunani *ROCOF*. Primerjavo definiramo kot *RFE* (»Rate of change of Frequency measurement Error«):

$$RFE = \left| \left(\frac{df}{dt} \right)_{\text{teoretično}} - \left(\frac{df}{dt} \right)_{\text{izmerjeno}} \right| \quad (9)$$

RFE velja za eno enoto. V našem primeru je enota en vzorčni zapis (»frame«).

4 OPIS TESTIRANIH ALGORITMOV

Obstaja več algoritmov, ki uporabljajo vzorčene podatke za izračun parametrov vzorčenih signalov. Vsak algoritem je navadno optimiziran le za določeno vrsto signala. Napetosti v elektroenergetskem omrežju so sinusne oblike in omrežne frekvence 50 Hz ter vsebujejo harmonske in interharmonske komponente, modulacije, frekvenčne, fazne in magnitudne skoke ter šum. Vsa našeta popačenja nastajajo dinamično in v različnem obsegu. Naloga algoritma je, da vsa popačenja izloči v največji meri in tako čim bolj natančno določi PMU-parametre, ki so vezani le na osnovno harmonsko komponento napetosti.

Za analizo je bilo izbranih sedem algoritmov, ki delujejo na minimizaciji različnih parametrov:

- DFT2 dvo-točkovna interpolacija DFT (Diskretna Fourierova Transformacija),
- DFT3 tri-točkovna interpolacija DFT,
- 4PSF štiri-parametrično sinusno prilagajanje,
- MHFE multiharmonsko sinusno prilagajanje,
- SLCA korekcija spektralnega uhajanja,
- PSFE fazno občutljivo sinusno prilagajanje,
- PSFEi interpolirano fazno občutljivo sinusno prilagajanje.

DFT2 in DFT3 uporabljata najmočnejšo spektralno komponento in sosednji komponenti (DFT2 le največjo) za interpolacijo ocene dejanskega spektralnega vrha [7]. 4PSF prilagaja sinusni val s prilagajanjem njegovih parametrov in minimizacijo vsote kvadratov razlik med vzorčenim signalom in prilagajanim modelom [8]. MHFE to tehniko razširi še na hkratno prilagajanje za vse harmonske komponente [9]. SLCA prilagaja spekter oknjene (»windowed«) vzorčenega signala na spekter oknjene sinusnega signala s prilagajanjem parametrov sinusnega signala in minimiziranjem vsote kvadratov razlik realnega in imaginarnega dela obeh spektrov [10].

Algoritem PSFE minimizira fazno razliko med dvema točkama vzorčenega signala in sinusnega vala [2]. Z ustrezno izbiro fazne razdalje minimizira vpliv harmonskih popačenj na določitev parametrov sinusnega vala. PSFEi nadalje interpolira fazno razdaljo na celoštevilski mnogokratnik celotne periode vzorčenega signala, s čimer v celoti odpravi vpliv harmonskih popačenj na določitev parametrov sinusnega vala [3].

Izbrani algoritmi so bili testirani pri statičnih in dinamičnih razmerah, kot jih predpisuje IEEE Std. C37.118.1-2011, Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems, Draft 3, April 2011 [6]. Rezultati meritev so predstavljeni v obliki faktorjev: *TVE* (»Total Vector Error«), *FE* (»Frequency Error«) in *RFE* (»ROCOF Error«).

5 IZVEDBA ANALIZE

Celotna analiza je bila izvedena v programskem paketu MATLAB. V prvi fazi je bil razvit modul za simuliranje signalov na prenosnih vodih [5]. Generirani signali veljajo za referenčne signale z referenčnimi parametri frekvence, magnitude in faze. Drugi programski modul je vzorčevalnik in analizator, ki je merilni del, v katerem se uporabljajo algoritmi. Algoritem iz vzorcev izračuna signalne parametre (frekvenca, faza in magnituda), nato se iz tega izračunajo še PMU-parametri [1]. Simulacije so bile izvedene pri naslednjih pogojih:

- Vzorčni čas $t_s = 100$ ms
- Število vzorcev $n = 1000$
- Število period $F_s = 5$

PMU standard predvideva naslednje statične in dinamične teste:

Statični testi

1. Linearna deviacija frekvence
2. Linearna deviacija magnitude
3. Linearna deviacija faze
4. Harmonsko popačenje
5. Zunajpasovna interferenca

Dinamični testi

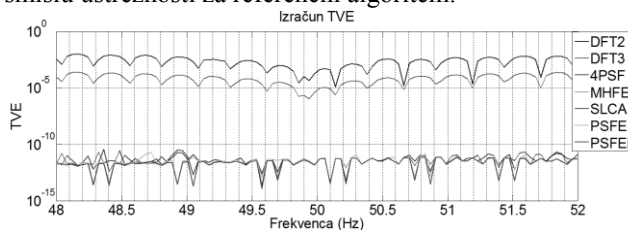
6. Amplitudna in fazna modulacija
7. Fazna modulacija
8. Frekvenčna rampa
9. Magnitudni skok

6 STATIČNI TESTI

6.1 Linearna deviacija frekvence

Za analizo je bil uporabljen osnovni testni signal sinusne oblike z efektivno amplitudo 230 V. Osnovnemu signalu se linearno spreminja frekvenca od 48 Hz do 52 Hz. Spodnji graf prikazuje *TVE* v odvisnosti od frekvenčne deviacije. Zaradi preglednosti

je *TVE* podan tudi v tabeli, kjer je označena ustreznost v smislu ustreznosti za referenčni algoritem.



Graf 1: Rezultati simulacije za *TVE*

Tabela 1: *TVE* v odvisnosti od frekvenčne deviacije

Frekvenčna deviacija		
Algoritem	<i>TVE</i>	ustreznost
DFT2	1,2E-05	►
DFT3	1,0E-06	►
4PSF	2,2E-14	✓
MHFE	1,1E-14	✓
SLCA	3,0E-14	✓
PSFE	2,9E-14	✓
PSFEi	1,2E-14	✓

Znak ✓ označuje, da je algoritem primeren za uporabo kot referenčni algoritem za kalibracijo PMU, medtem ko znak ► označuje, da algoritem sicer ustreza normativom iz standarda, vendar ne izpolnjuje kriterijev za referenčni algoritem, ki so določeni za vsak test posebej.

Referenčni algoritmi se uporabljajo za kalibracijo merilnega sistema znotraj PMU-merilnika, ki uporablja svoj interni algoritem. Ta mora zadostiti normativom, podanim v standardu.

6.2 Linearna deviacija magnitude

Osnovnemu signalu se linearno spreminja magnituda od 10 % do 120 % glede na referenčno magnitudo. Ugotovljeno je bilo, da linearna deviacija magnitude ne vpliva na izračun.

Tabela 2: *TVE* za deviacijo magnitude

Linearna deviacija magnitude		
Algoritem	<i>TVE</i>	ustreznost
DFT2	2,9E-04	►
DFT3	6,5E-06	►
4PSF	3,0E-12	✓
MHFE	3,0E-12	✓
SLCA	3,0E-12	✓
PSFE	3,0E-12	✓
PSFEi	2,5E-12	✓

Vsi algoritmi sledijo spremembi magnitude. Rezultati se razlikujejo zaradi osnovne zmogljivosti merjenja magnitude. Ker so rezultati za *TVE* neodvisni od deviacije, so rezultati podani tabelarično.

DFT2 in DFT3 dajeta slabše rezultate kot drugi algoritmi, zato nista primerna kot referenčna algoritma za izračun *TVE*.

6.3 Linearna deviacija faze

Osnovnemu signalu se spreminja faza linearno od $-\pi$ do $+\pi$ radianov. Predvidena hitrost fazne deviacije ne vpliva na izračun *TVE*, zato so rezultati podani tabelarično.

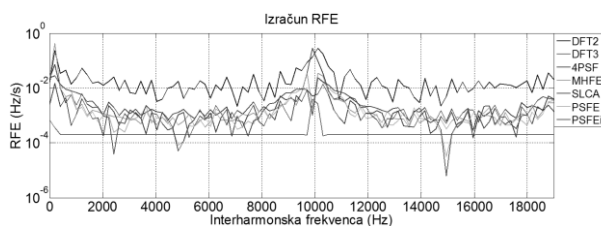
Tabela 3: *TVE* za deviacijo faze

Linearna deviacija faze		
Algoritem	<i>TVE</i>	ustreznost
DFT2	2,9E-04	►
DFT3	6,6E-06	►
4PSF	3,0E-12	✓
MHFE	3,0E-12	✓
SLCA	3,0E-12	✓
PSFE	3,0E-12	✓
PSFEi	3,0E-12	✓

DFT2 in DFT3 dajeta občutno slabše rezultate glede na druge algoritme, zato nista primerna kot referenčna algoritma za izračun *TVE* pri linearni deviaciji faze.

6.4 Zunajpasovna interferenca

Osnovnemu signalu je dodana interferenčna motnja amplitude 10 % osnovnega signala. Motnja spreminja frekvenco od 0 do 19 kHz. Test preveri, kako vpliva zunajpasovna interferenca na delovanje posameznega algoritma. Zunajpasovno območje je v tem primeru vse nad frekvenco 5 kHz, saj je vzorčevalna frekvenca 10 kHz.



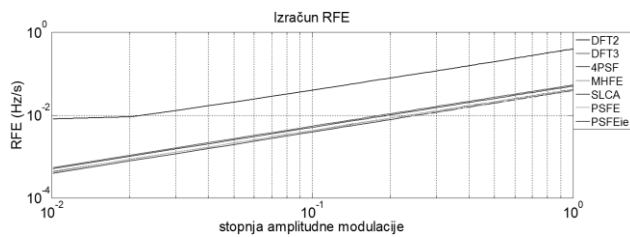
Graf 2: *RFE* pri testu izven pasovne interferenčne

Zunajpasovna interferenca močno vpliva na izračun *RFE* pri vseh algoritmi, razen pri PSFEi. Večje odstopanje nastane pri vzorčni frekvenci, kjer napake izračunov *RFE* pri vseh algoritmi narastejo. Najbolj točen in stabilen algoritem je PSFEi, zato je edini izbran kot ustrezen.

7 DINAMIČNI TESTI

7.1 Amplitudna in fazna modulacija

Osnovnemu signalu sta dodani amplitudna in fazna modulacija, ki narašča z modulacijskim indeksom k , in sicer za obe modulaciji od $k = 0$ do $k = 1$.



Graf 3: RFE pri modulacijskem testu

Graf prikazuje, da stopnja modulacije znatno vpliva na izračun PMU-parametrov. To velja za vse testirane algoritme. Na grafu se kaže neposredna odvisnost RFE od stopnje modulacije. Standard predvideva mejno vrednost 2 Hz/s za RFE pri modulacijskem indeksu $k=0,1$ za obe modulaciji. Vsi testirani algoritmi izpolnjujejo zahtevano točnost. Slabše rezultate daje DFT2.

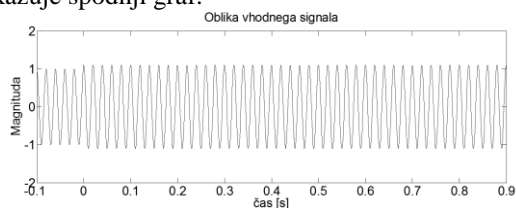
Tabela 4: RFE pri amplitudni in fazni modulaciji

Amplitudna in fazna modulacija		
Algoritem	RFE	ustreznost
DFT2	0,037	►
DFT3	0,005	✓
4PSF	0,004	✓
MHFE	0,004	✓
SLCA	0,004	✓
PSFE	0,004	✓
PSFEi	0,005	✓

Podobne grafe dobimo, če se osnovnemu signalu doda le fazna modulacija.

7.2 Magnitudni skok

Osnovni signal ob določenem trenutku (ob času $t=0$ s) spremeni magnitudo za 10 % osnovne magnitude, kot prikazuje spodnji graf.



Graf 4: Magnitudni skok

Algoritmi delujejo zelo različno, vendar rezultati niso povezani z magnitudnim skokom, temveč z osnovno točnostjo merjenja magnitude, faze in frekvence oz. posledično z izračunom PMU-parametrov. Magnitudni skok torej ne vpliva na delovanje algoritmov.

Tabela 5: RFE pri magnitudnem skoku

Magnitudni skok		
Algoritem	RFE	ustreznost
DFT2	0,0514	►
DFT3	0,0061	►
4PSF	0,0003	✓
MHFE	0,0002	✓
SLCA	0,0002	✓
PSFE	0,0001	✓
PSFEi	0,0001	✓

8 IZBIRNI DIAGRAM

Na podlagi standardnih preskusov je bil pripravljen izbirni diagram, ki vrednoti izbrane referenčne algoritme glede na njihovo zmogljivost. Vrednotenje zmogljivosti algoritma je označeno z naslednjima simboloma:

- ✓ primerna zmogljivost za referenčni algoritem
- neprimerna zmogljivost za referenčni algoritem

Tabela 6: Izbirni diagram za TVE

Test	DFT2	DFT3	4PSF	MHFE	SLCA	PSFE	PSFEi
Frek. dev.	►	►	✓	✓	✓	✓	✓
Mag. dev.	►	►	✓	✓	✓	✓	✓
Faz. dev.	►	►	✓	✓	✓	✓	✓
THD	►	►	►	►	►	✓	✓
Pasovna int.	►	►	►	►	►	►	✓
Mag. mod.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Frek. ramp.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Mag. ramp.	►	►	✓	✓	✓	✓	✓

Tabela 7: Izbirni diagram za FE

Test	DFT2	DFT3	4PSF	MHFE	SLCA	PSFE	PSFEi
Frek. dev.	►	►	✓	✓	✓	✓	✓
THD	►	►	►	►	►	✓	✓
Pasovna int.	►	►	►	►	►	►	✓
Mag. mod.	►	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Faz. mod.	►	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Frek. ramp.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Mag. ramp.	►	►	✓	✓	✓	✓	✓

Tabela 8: Izbirni diagram za RFE

Test	DFT2	DFT3	4PSF	MHFE	SLCA	PSFE	PSFEi
Frek. dev.	►	►	✓	✓	✓	✓	✓
THD	►	►	►	►	►	✓	✓
Pasovna int.	►	►	►	►	►	►	✓
Mag. mod.	►	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Faz. mod.	►	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Frek. ramp.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Mag. ramp.	►	►	✓	✓	►	►	✓

9 SKLEP

Z celovito analizo je bilo ovrednoteno delovanje posameznega algoritma. Ugotovljeno je bilo, kateri algoritmi najboljše delujejo za posamezni standardni test za statične in dinamične pogoje. Vsak algoritem ima svoje posebnosti, zato se tudi rezultati med seboj razlikujejo. Pri izdelavi kalibracijskega protokola se

bodo upoštevale zmogljivosti posameznega referenčnega algoritma tako, da bo za vsak standardni test predviden najbolj točen algoritem. Za doseganje čim manjših merilnih negotovosti je torej treba zagotoviti referenčne algoritme, ki bodo zanesljivo preverili specifikacije PMU-merilnikov. Kalibracijski protokol bo tako preveril pravilnost delovanja internega algoritma, vgrajenega v PMU-merilnik. Ni dovolj, da je referenčni algoritem znotraj specifikacij, ki jih določa standarda, te zahteve namreč veljajo za PMU-merilnike same. Referenčni algoritmi morajo zagotavljati manjše negotovosti.

V nadaljevanju projekta bodo algoritmi testirani še na pravih PMU-merilnikih, kjer se bodo verjetno pokazali novi izzivi in predvsem nove zahteve. Vse to vodi v izpopolnjevanje in prilagoditev obstoječih algoritmov, ki bodo zagotovili celovito verifikacijo PMU-merilnikov ter zagotavljali zanesljivo in učinkovito regulacijo elektroenergetskega sistema, sestavljenega iz klasičnih in alternativnih virov ter klasičnih in kompleksnih porabnikov.

ZAHVALA

Delo, predstavljeno v tem članku, je del EURAMET-ovega skupnega raziskovalnega projekta SMART GRID in je financirano iz sedmega okvirnega programa Evropske unije na podlagi odločitve št. 912/20097EC.

LITERATURA

- [1] M. Kokalj, R. Lapuh, M. Lindič, B. Voljč, B. Pinter, Z. Svetik: High accuracy signal parameter estimation algorithm for calibration of PMU devices, CPEM 2012, Washington DC, USA, July 2012.
- [2] R. Lapuh, "Phase sensitive frequency estimation algorithm for asynchronously sampled harmonically distorted signals," in Proc. International Instrum. and Meas. Conf., Hangzhou, China, pp. 888–891, May 10–12, 2011.
- [3] R. Lapuh, Interpolated phase sensitive frequency estimator for fast estimation of harmonically distorted signals, ERK 2010, Portorož, Slovenija, september 2010.
- [4] PC37.118.1 Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems, Draft 3, April 2011.
- [5] U. Pogliano, J-P. Braun, R. Lapuh and B. Voljč, "Software Platform for PMU Algorithms Testing", presented at CPEM 2012.
- [6] Razvoj algoritma za kalibracijo PMU naprav, ERK 2012, Portorož, Slovenija, September 2012.
- [7] J. Schoukens, R. Pintelon, and H. Van Hamme, "The Interpolated Fast Fourier Transform: A Comparative Study", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 41, No. 2, pp. 226–232, April 1992.
- [8] IEEE Std 1057–2007, "IEEE Standard for Digitizing Waveform Recorders," April 2008.
- [9] R. Pintelon, and J. Schoukens, "An improved sine-wave fitting procedure for characterizing data acquisition channels," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 45, no. 2, pp. 588–593, April 1996.
- [10] T. Radil, P.M. Ramos, A.C. Serra, " New spectrum leakage correction algorithm for frequency estimation of power system signals," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 58, no. 5, pp. 1670–1679, May 2009.

Miha Kokalj je diplomiral leta 2011 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je kot višji metrolog v SIQ. Ukvarja se s kalibracijami na področju impedance, vibracij in visokih frekvenc. Raziskovalno deluje na področju pametnih omrežij in EMC-tehnologij ter sodeluje pri lokalnih in mednarodnih raziskovalnih projektih.

Rado Lapuh je diplomiral leta 1987, magistriral leta 1991 in doktoriral leta 1994 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je kot sekretar na Uradu RS za meroslovje ter kot raziskovalec v SIQ in na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo meroslovje, električna merjenja in procesiranje signalov.

Boštjan Voljč je diplomiral leta 2002 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Od leta 2001 je zaposlen v SIQ kot višji metrolog. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo predvsem področje enosmernih in nizkofrekvenčnih električnih veličin.

Borut Pinter se je rodil leta 1975 v Murski Soboti. Leta 2005 je diplomiral na Fakulteti za matematiko in fiziko kot diplomirani inženir fizike. Na SIQ Ljubljana se je redno zaposlil leta 2006, kjer dela na področju meroslovja kot raziskovalec in na področju razvoja. Njegove primarne raziskovalne aktivnosti so na področju visokih frekvence pri meroslovju električnih veličin. Deluje tudi kot raziskovalec na področju meroslovja za čas in frekvenco, akustike, vibracij, enosmernih in nizkofrekvenčnih veličin ter impedance. V zadnjem času deluje tudi kot raziskovalec pri lokalnih in mednarodnih raziskovalnih projektih.

Matjaž Lindič je diplomiral leta 1990 in magistriral leta 1993 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je v SIQ kot pomočnik direktorja preskusnih in merilnih tehnologij. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo različna področja meroslovja, še posebej iz električnih merjenj ter časa in frekvence.

Zoran Svetik je diplomiral leta 1982 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Zaposlen je v SIQ kot direktor področja Preskusne in merilne tehnologije. Njegovi raziskovalni interesi vključujejo meroslovje in še posebej električna ter z njimi povezana merjenja, pa tudi preskušanje proizvodov, programske opreme in informacijskih sistemov.