Analiza algoritmov za izračun PMU parametrov

Miha Kokalj¹, Boštjan Voljč¹, Borut Pinter¹, Matjaž Lindič, Zoran Svetik, Rado Lapuh^{1,2}

¹ Slovenski institut za kakovost in meroslovje (SIQ), Tržaška cesta 2, 1000 Ljubljana, Slovenija
² Urad Republike Slovenije za meroslovje, Tkalska 15, 3000 Celje, Slovenija
miha.kokalj@sig.si

PMU calculation algorithm analysis

The paper describes analysis of various algorithms used for calculation of PMU (Phasor Measurement Unit) parameters. Power signals on electricity grid are measured with a PMU, which samples the electrical waves on an electricity grid, using a common time source for synchronization. Time synchronization allows synchronized real-time measurements of multiple remote measurement points on the grid. In power engineering, these are also commonly referred to synchrophasors and are considered one of the most important measuring devices in the future of power systems which enables real time monitoring of a transmission power line. Real time monitoring enables automatic regulation or recovery of transmission line in case of power fails.

The article presents a continued work on a Smart Grid project that is coordinated by EMRP. The first stage of the project was to develop an improved algorithm; second stage was to analyze various algorithms according to standardized tests [4].

1 Uvod

V članku so predstavljeni rezultati analize različnih algoritmov za izračun PMU parametrov, ki se uporabljajo za nadzor energetskega omrežja. Članek predstavlja nadaljevanje dela na projektu Smart Grid, ki se izvaja v sklopu programa EMRP.

PMU parametri se merijo na različnih koncih prenosnega omrežja z uporabo PMU merilnikov (Phasor Measurement Units), ki 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 kompleksna, tok energije ne bo več tekel v eno, ampak v obe ali več smeri. Klasični energetski 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. Omrežja prihodnosti pa so in bodo delovala tako, da se energija distribuira na način, pri katerem je omrežje najbolj učinkovito in predvsem stabilno. Poznamo več virov klasične energije, kot so hidro energija, termo energija, jedrska energija ter več virov nove, zelene energije, kot so vetrna energija, sončna energija itd. Vsi ti viri energije so razpršeni po omrežju, kar prinaša zelo kompleksno regulacijo.

Za pravilno regulacijo je potrebno poznati stanje na omrežju, ki ga sporočajo preverjeni oziroma kalibrirani PMU merilniki. PMU merilniki sinhrono vzorčijo signale na energetskem omrežju in iz teh vzorcev izračunavajo PMU parametre. Izračuni se vršijo z uporabo matematičnih algoritmov, različni algoritmi pa lahko dajejo 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 najbolj primeren za kalibracijo definiranega standardiziranega testa.

2 Opis testiranih algoritmov

Obstaja več algoritmov, ki uporabljajo vzorčene podatke za izračun signalnih parametrov. Vsak algoritem je navadno specificiran le za določeno ozko področje. Signali na energetskem omrežju so sinusne oblike in omrežne frekvence 50 Hz ter vsebujejo: harmonske komponente, inter-harmonske komponente ter šum. Vsa našteta popačenja se pojavljajo v omejenih obsegih. Naloga algoritma je, da vsa popačenja izloči v največji možni meri in tako čim bolj natančno določi PMU parametre.

Za analizo je bilo izbranih sedem algoritmov, kateri vsi izhajajo iz iste družine:

- DFT dvo-točkovna interpolacija DFT (Diskretna Fouriereva Transformacija),
- DFT3 tri-točkovna interpolacija DFT,
- 4PSF štiri parametrično sinusno prilagajanje,
- MHFE multi harmonsko sinusno prilagajanje,
- SLCA korekcija spektralnega uhajanja,
- PSFE fazno občutljivo sinusno prilagajanje [3],
- PSFEi interpolirano fazno občutljivo sinusno prilagajanje [6].

Razlika med njimi je v tem, da izbirajo različne kriterije za interpolacijo. Izbrani algoritmi so bili testirani pri statičnih in dinamičnih razmerah, kot jih predpisuje PC37.118.1 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).

3 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 predstavlja 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 po znanih formulah. [1]

Osnovni testni signal je sinusne oblike s frekvenco f=50 Hz in magnitudo 230 V. PMU standard predvideva naslednje statične in dinamične teste:

Statični testi

- 1. Deviacija frekvence
- 2. Deviacija magnitude
- 3. Deviacija faze
- 4. Harmonsko popačenje
- 5. Izven pasovna interferenca

Dinamični testi

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

4 Statični testi

4.1 Deviacija frekvence

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 sta izpostavljena minimalna in maksimalna vrednost TVE.



Graf 1: rezultati simulacije za TVE (max TVE=1 %)

Freq.dev.	TVE min TVE ma				
DFT2	1,16E-05	9,99E-03			
DFT3	1,00E-06	2,40E-04			
4PSF	2,18E-14	3,61E-11			
MHFE	1,15E-14	7,16E-12			
SLCA	2,99E-14	1,90E-11			
PSFE	2,85E-14	1,86E-11			
PSEFi	1 15F-14	6 93F-12			

Tabela 1: TVE v odvisnosti od frekvenčne deviacije

Vsi algoritmi dajo rezultate, ki ustrezajo specifikacijam za predvideno deviacijo frekvence. Graf 1 kaže, da algoritma DFT2 in DFT3 dajeta nekoliko slabše rezultate. Ostali algoritmi delujejo precej podobno.

4.2 Deviacija magnitude

Osnovnemu signalu se spreminja magnituda linearno od 10 % do 120 % glede na referenčno magnitudo. Deviacija magnitude s predvideno hitrostjo deviacije ne vpliva bistveno na izračun. Ker so rezultati za TVE neodvisni od deviacije, so rezultati podani tabelarično.

Sig. Dev.	TVE
DFT2	2,89E-04
DFT3	6,51E-06
4PSF	3,01E-12
MHFE	3,01E-12
SLCA	3,01E-12
PSFE	3,01E-12
PSFEi	2,54E-12

Tabela 2: TVE za deviacijo magnitude

Mejna vrednost TVE je določena na 1 %. Vsi testirani algoritmi ustrezajo zahtevam. DFT2 in DFT3 dajeta slabše rezultate glede na druge algoritme.

4.3 Deviacija faze

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

Pha. Dev.	TVE
DFT2	2,91E-04
DFT3	6,57E-06
4PSF	3,03E-12
MHFE	3,03E-12
SLCA	3,02E-12
PSFE	3,02E-12
PSFEi	3,03E-12

Tabela 3: TVE za deviacijo faze

Mejna vrednost TVE je določena na 1 %. Vsi testirani algoritmi ustrezajo zahtevam. DFT2 in DFT3 dajeta slabše rezultate glede na druge algoritme.

4.4 Harmonsko popačenje

Osnovnemu signalu so dodani harmoniki z 10 % magnitudo osnovnega signala. Na grafu je prikazana odvisnost RFE od števila dodanih harmonskih komponent vse do stotega harmonika.



Graf 2: RFE pri harmonskem popačenju

Mejna vrednost RFE je določena na 6 Hz/Hz. Vsi algoritmi so znotraj mejnih vrednosti, ki jih predpisuje standard. Rezultati meritev (DFT2, DFT3, 4PSF, MHFE in SLCA) so odvisni od števila dodanih harmonskih komponent. Algoritma PSFE in PSFEi sta specialna algoritma za izločanje harmonskih komponent, zato v tem primeru dobimo boljše rezultate [2].

Rezultati za harmonsko popačenje, ko je na osnovnem signalu 100 harmonskih komponent in so PMU parametri stabilni, so predstavljeni tudi tabelarično.

THD	TVE
DFT2	0,00745
DFT3	0,00227
4PSF	0,02800
MHFE	0,03785
SLCA	0,00240
PSFE	0,00227
PSFEi	2,65E-12

Tabela 4: TVE pri harmonskem popačenju (max TVE=1 %)

THD	FE			
DFT2	0,02254			
DFT3	0,00007			
4PSF	0,08656			
MHFE	0,11682			
SLCA	0,00135			
PSFE	2,13E-11			
PSFEi	2,15E-11			

Tabela 5: FE pri harmonskem popačenju (max FE=0,025 Hz)

THD	RFE		
DFT2	0,16725		
DFT3	0,00063		
4PSF 0,655			
MHFE	0,88570		
SLCA	0,01225		
PSFE	1,28E-10		
PSFEi	1,47E-10		

Tabela 6: RFE pri harmonskem popačenju (max RFE=6 Hz/s)

Pri močno harmonično popačenem signalu daje najboljše rezultate PSFEi. Vsi algoritmi so sicer znotraj zahtevanih specifikacij. Zanimiva je razlika med PSFE in PSFEi pri merjenju TVE. Interpolirano fazno občutljivo sinusno prilagajanje daje namreč boljše rezultate. Pri merjenju FE in RFE med PSFE in PSFEi praktično ni razlike.

4.5 Izven pasovna interferenca

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



Graf 3: RFE pri testu izven pasovne interference

Graf prikazuje, da se vsi algoritmi približno enako obnašajo pri interferenčni motnji. Vpliv interferenčne motnje je večji pri pasovnih frekvencah, kar pomeni da »anti-aliasing« fiter dobro deluje pri vseh algoritmih.

5 Dinamični testi

5.1 Amplitudna in fazna modulacij

Osnovnemu signalu je dodana amplitudna in fazna modulacija z modulacijskima indeksoma k=0,1.



Graf 4: TVE 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 TVE od stopnje modulacije. Standard predvideva mejno vrednost za TVE na 3 %. Vsi testirani algoritmi izpolnjujejo zahtevano točnost.

Podobne grafe dobimo, če se v osnovni signal doda le fazno modulacijo.

5.2 Frekvenčna rampa

Osnovni signal linearno spreminja frekvenco s hitrostjo 1 Hz/s. Algoritmi se obnašajo precej podobno. Sprememba frekvence s to hitrostjo nima vpliva na delovanje algoritmov. Vsi algoritmi torej konsistentno sledijo frekvenčni rampi.

Ramp	RFE
DFT2	0,507
DFT3	0,499
4PSF	0,494
MHFE	0,494
SLCA	0,493
PSFE	0,493
PSFEi	0,479

Tabela 7: RFE pri testu frekvenčne rampe

Test je bil izveden za pozitivno in negativno frekvenčno rampo. Rezultati so v obeh primerih enaki.

5.3 Magnitudni skok

Osnovni signal ob določenem trenutku spremeni magnitudo za 10 % osnovne magnitude, kot prikazuje spodnji graf.



Graf 5: Magnitudni skok, oblika signala

Step	RFE
DFT2	0,05141
DFT3	0,00611
4PSF	0,00035
MHFE	0,00019
SLCA	0,00016
PSFE	0,00009
PSFEi	0.00013

Tabela 8: RFE pri magnitudnem skoku

Algoritmi delujejo zelo različno, vendar rezultati niso povezani z magnitudnim skokom pač pa z splošno točnostjo merjenja magnitude, faze in frekvence oz. posledično izračunom PMU parametrov. Magnitudno skok torej ne vpliva znatno na delovanje algoritmov. Graf 8 jasno kaže, da magnitudni skok ni vpliven parameter pr izračunu RFE, saj so rezultati izračunov časovno oz. dinamično neodvisni.



Graf 6: RFE pri magnitudnem skoku

6 Izbirni diagram

Na podlagi standardnih preskusov je bil pripravljen izbirni diagram, ki vrednoti posamezne algoritme za določen test. Vrednotenje zmogljivosti algoritma je označeno z naslednjimi pomenskimi znaki:

- + odlična zmogljivost
- srednje dobra zmogljivost
- slabo delovanje

Test	DFT2	DFT3	4PSF	MHFE	SLCA	PSFE	PSFEi
Frek. dev.	-	0	+	+	+	+	+
Mag. Dev.	0	0	+	+	+	+	+
Faz. Dev.	-	0	+	+	+	+	+
THD	-	-	0	-	-	0	+
Pasovna Int.	+	+	+	+	+	+	+
Mag. Mod.	+	+	+	+	+	+	+
Frek. Ramp.	0	0	0	0	+	0	+
Mag.Ramp.	0	+	+	+	+	+	+

Tabela 9: Izbirni diagram za TVE

Test	DFT2	DFT3	4PSF	MHFE	SLCA	PSFE	PSFEi
Frek. dev.	-	0	+	+	+	+	+
THD	-	0	-	-	0	+	+
Pasovna Int.	0	0	0	0	0	0	+
Mag. Mod.	0	+	+	+	+	+	+
Faz. Mod.	0	+	+	+	+	+	+
Frek. Ramp.	0	0	+	+	+	+	0
Mag Ramp	0	+	+	+	+	+	+

Tabela 10: Izbirni diagram za FE

Test	DFT2	DFT3	4PSF	MHFE	SLCA	PSFE	PSFEi
Frek. dev.	0	0	+	+	+	+	+
THD	0	0	0	0	0	+	+
Pasovna Int.	0	0	0	0	0	0	+
Mag. Mod.	0	+	+	+	+	+	+
Faz. Mod.	0	+	+	+	+	+	+
Frek. Ramp.	-	-	0	0	0	+	+
Mag.Ramp.	-	0	+	+	+	+	+

Tabela 11: Izbirni diagram za RFE

7 Zaključek

Z analizo algoritmov je bilo ovrednoteno delovanje posameznega algoritma. Ugotovljeno je bilo kateri algoritmi najbolje delujejo za posamezni test. 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 ali prilagoditev obstoječih algoritmov, ki bodo zagotovili celovito verifikacijo PMU merilnikov.

Literatura

- M. Kokalj, R. Lapuh, M. Lindič, B. Voljč, B. Pinter, Z. Svetik: High accuracy signal parameter estimation algorithm for calibraiton of PMU decives, CPEM 2012, Washington DC, USA, July 2012
- [2] R. Lapuh, Interpolated phase sensitive frequency estimator for fast estimation of harmonically distorted signals, ERK 2010, Portorož, Slovenija, september 2010
- [3] R. Lapuh, "Phase estimation of asynchronously sampled signal using interpolated three-parameter sinewave fit technique," Conf. Dig. I2MTC 2010, Austin, Texas, May 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

Analiza algoritmov za izračun PMU parametrov

Miha Kokalj Portorož, 2013



Vsebina

- Motivacija
- O projektu "Smart Grid"
- Prispevek SIQ
- Zaključek



Alternativni viri energije

- Cilji EU do leta 2020:
 - Zmanjšanje CO₂ za 20 %
 - Proizvodnja energije iz obnovljivih virov 20 %
 - Zmanjšanje porabe energije za 20 %





Klasično električno omrežje

Značilnosti:

- Nekaj velikih elektrarn
- Smer električne energije gre v eno smer – od elektrarn do porabnikov
- Enostavni porabniki, enostavna nespremenljiva bremena





Pametno omrežje - Smart Grid

Značilnosti:

- Dvosmerni pretok energije
- Lokalni viri energije + velike elektrarne
- Kompleksna spremenljiva bremena

- Razpršenost virov energije
- Mehanizmi za zagotavljanje kvalitete





Izzivi za metrologijo

- Dve glavni nalogi:
- Zagotoviti kontinuiteto elektične energije
- Zagotvaljati zanesljivost in kvaliteto



V sklopu EMRP – Europena Metrology Research Programme se je izoblikoval evropski projekt Smart Grid.

EUROPEAN MEtrology Research Programme



The EMRP is jointly funded by the EMRP participating countries within EURAMET and the European Union

Naloge projekta Smart Grid:

- Modelirati omrežje
- Izmeriti PMU Phasor Measurement Unit
- Razviti mehanizme za zagotavljanje kvalitete
- Meriti energijo





PMU – Phasor Measurement Unit

PMU je naprava, ki se uporablja v energetskem sistemu za merjenje frekvence, amplitude napetosti in toka ter njunega faznega kota ob znanih časovnih intervalih, kar omogoča:

• Primerjavo in usklajevanje podatkov s posameznih PMU naprav v realnem času, ker je sistem sinhroniziran na GPS čas.

$$V = A \sin (\omega t + \phi)$$

PMU parametri:

- TVE (Total Vector Error)
- PE (Phase Error)
- RFE (ROCOF Error Rate of change of Frequency measurement Error)

$$TVE = \sqrt{\frac{(X_r(n) - X_r)^2 + (X_i(n) - X_i)^2}{X_r^2 + X_i^2}}$$
$$PE = \left| \psi(t)_{teoretično} - \psi(n)_{izmerjeno} \right|$$
$$RFE = \left| \left(\frac{df}{dt} \right)_{teoretično} - \left(\frac{df}{dt} \right)_{izmerjeno} \right|$$



Aplikacije PMU

- Analiza
 - Wide Area Situational Awareness (WASA) nadzor sistema in izboljšanje komunikacije med operaterji
 - Nadzor stabilnosti napetosti, faze in frekvence
- Kontrola
 - Kontrola v realnem času
 - Rezervni viri energije (vključitev po potrebi)
- Zaščita
 - Nadzor nizkofrekvenčnih nihanj
 - Takojšna opozorila o napakah
 - Uporaba spremenljivih bremen za uravnovešanje (po potrebi)
 - Mehanzni za avtomatsko ponovno vzpostavitev sistema po napaki

Glavni namen: zagotoviti kvaliteto in zanesljivost omrežja









PMU Kalibrator



PMU merilnik



Simulacija

- Omrežna frekvenca približno 50 Hz
- Harmonske komponente
- Inter-harmonske komponente
- Šum
- Amplitudna, frekvenčna in fazna modulacija
- Amplitudni, frekvenčni in fazni skok









Izbira algoritmov

- DFT dvo-točkovna interpolacija DFT (Diskretna Fouriereva Transformacija)
- DFT3 tri-točkovna interpolacija DFT
- 4PSF štiri parametrično sinusno prilagajanje
- MHFE multi harmonsko sinusno prilagajanje
- SLCA korekcija spektralnega uhajanja
- PSFE fazno občutljivo sinusno prilagajanje
- PSFEi interpolirano fazno občutljivo sinusno prilagajanje





Analiza algoritmov

- Statični testi
 - Deviacija frekvence
 - Deviacija magnitude
 - Deviacija faze
 - Harmonsko popačenje
 - Izven pasovna interferenca
- Dinamični testi
 - Amplitudna in fazna modulacija
 - Fazna modulacija
 - Frekvenčna rampa
 - Magnitudni skok







Primer testa: Izven pasovna interferenca



Rezultat: Izbirni diagram

Test	DFT2	DFT3	4PSF	MHFE	SLCA	PSFE	PSFEi
Freq. Deviation	-	0	+	+	+	+	+
Mag. Deviation	0	0	+	+	+	+	+
Phase Deviation	-	0	+	+	+	+	+
THD	-	-	0	-	-	0	+
Out-of-band	+	+	+	+	+	+	+
Interference							
Phase and Amp. Mod.	+	+	+	+	+	+	+
Phase Modulation	0	0	+	+	+	+	+
Linear Freq. Ramp	0	0	0	0	+	0	+
Mag. Step	0	+	+	+	+	+	+

TVE

Test	DFT2	DFT3	4PSF	MHFE	SLCA	PSFE	PSFEi
Freq. Deviation	-	0	+	+	+	+	+
THD	-	0	-	-	0	+	+
Out-of-band	0	0	0	0	0	0	+
Interference							
Phase and Amp. Mod.	0	+	+	+	+	+	+
Phase Modulation	0	+	+	+	+	+	+
Linear Freq. Ramp	0	0	+	+	+	+	0
Mag. Step	0	+	+	+	+	+	+

Test	DFT2	DFT3	4PSF	MHFE	SLCA	PSFE	PSFEi
Freq. Deviation	0	0	+	+	+	+	+
THD	0	0	0	0	0	+	+
Out-of-band	0	0	0	0	0	0	+
Interference							
Phase and Amp. Mod.	0	+	+	+	+	+	+
Phase Modulation	0	+	+	+	+	+	+
Linear Freq. Ramp	-	-	0	0	0	+	+
Mag. Step	-	0	+	+	+	+	+

FE

RFE

Hvala za pozornost

SMART GRID METROLOGY

The EMRP is jointly funded by the EMRP participating countries within EURAMET and the European Union

