

Harmonska analiza algoritmov za merilnik fazorjev pri različnih frekvencah vzorčenja

Marko Berginc¹, Miha Kokalj¹, Rado Lapuh², Boštjan Voljč¹, Borut Pinter¹,
Matjaž Lindič¹

¹ Slovenski institut za kakovost in meroslovje, Tržaška 2, 1000 Ljubljana, Slovenija

² Urad za meroslovje Republike Slovenije, Tkalska 15, 3000 Celje, Slovenija

E-pošta: marko.berginc@siq.si

Harmonic analysis of phasor-measurement-unit algorithms for different sampling frequencies

Abstract. Phasor-Measurements-Units (PMUs) are vital components for smart grids as they provide amplitude, frequency and phase of the grid's fundamental signal in real-time in the presence of different disturbances like harmonic distortion, noise, etc. Herein we evaluate a performance of six algorithms (i) for single harmonic distortion test as required by the standard and (ii) for four realistic harmonically distorted signals. The sampling frequency was either 1 kHz or 5 kHz. At 1 kHz an aliasing occurs for several harmonics and here high estimation errors were produced by all algorithms therefore no algorithms can comply with the standard. Additionally the 4PSF (four Points Sine Fit algorithm) and MHFE (Multi Harmonic Frequency Estimation algorithm) produce high errors also for several others harmonics. At 5 kHz the aliasing is significantly shifted towards higher frequencies therefore most algorithms with exception of 4PSF and MHFE meet requirement of the standard.

1 Uvod

Elektroenergetsko omrežje postaja vse kompleksnejše, saj je nanj povezanih vedno več obnovljivih virov energije (sončne in vetrne elektrarne, male hidroelektrarne, itd.). Te elektrarne lahko lokalno dvigujejo napetost omrežja in vanj zaradi uporabe razsmerniških vezij vnašajo številne motnje. Zaradi obeh neželenih dejavnikov je vse bolj potrebno spremljati stanje omrežja na različnih lokacijah z merilniki fazorjev PMU (angl. *Phasor-Measurements-Units*). Merilniki PMU morajo v realnem času za vse faze sistema čim bolj točno podati amplitudo (napetost ali tok), frekvenco in fazo osnovnega signala, kljub prisotnosti različnih motilnih signalov (harmoniki, interharmoniki, šum, itd.). Za ta namen so bili v preteklosti razviti številni algoritmi, ki se razlikujejo v numerični zahtevnosti, v točnosti določevanja parametrov osnovnega signala, kot tudi v občutljivosti na različne motilne signale.

Naša predhodna celovita obravnava šestih algoritmov pri frekvenci vzorčenja $f_s = 1$ kHz je pokazala [1], da skladnosti s standardom IEEE Std. C37.118.1a-2014 [2] ob prisotnosti nekaterih

harmonikov ni dosežena. Zato se v tem prispevku posvečamo podrobnejši analizi delovanja teh algoritmov pri dveh frekvencah vzorčenja ($f_s = 1$ kHz in 5 kHz) ob prisotnosti različnih harmonskih popačenj. Obravnavamo (i) signale popačene z enim harmonikom (2.-50. harmonske komponente) z amplitudo 10% osnovnega signala [2] in (ii) štiri realne harmonske popačene signale.

2 Platforma za simulacije

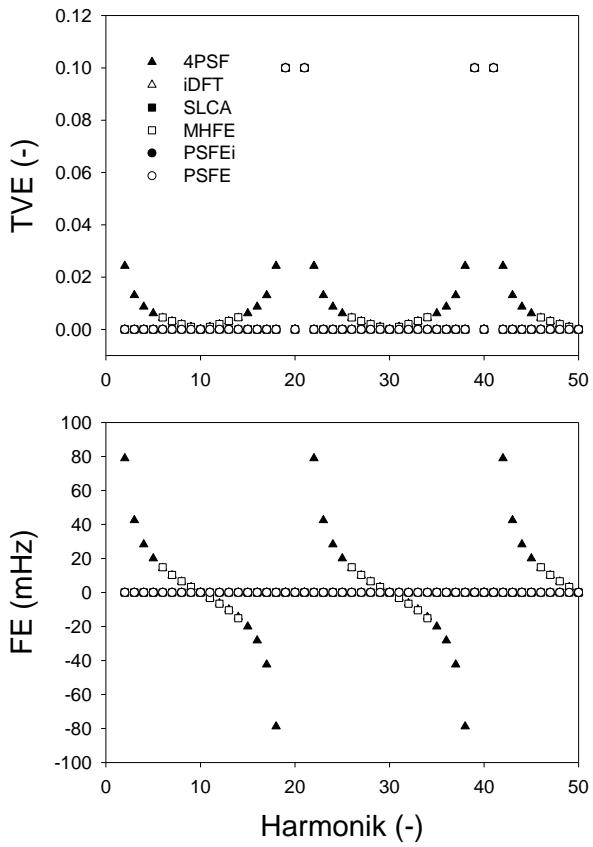
Za analizo algoritmov smo sprva razvili simulacijsko platformo v okolju MATLAB [1]. V simulacijah se sprva določi (časovno odvisno) amplitudo A , frekvenco f in fazo φ osnovnega signala, ki je referenčna vrednost pri kasnejšem izračunu napak. Osnovnemu signalu se po potrebi pridajejo najrazličnejši motilni signali. Skupen signal se nato posreduje različnim algoritmom, ki določijo A , f in φ . Na podlagi ocenjene vrednosti in znane referenčne vrednosti se izračunajo napake algoritmov. Prva pomembna napaka algoritmov je napaka vektorja TVE (1), angl. *Total Vector Error*, v kateri $X_{r,e}$ in $X_{i,e}$ označujeta realno in imaginarno komponento ocene fazorja, ter $X_{r,r}$ in $X_{i,r}$ realno in imaginarno komponento referenčne vrednosti fazorja. Druga pomembna napaka je napaka frekvence FE (angl. *Frequency Error*) in je razlika med referenčno in ocenjeno vrednostjo frekvence.

$$TVE = \sqrt{\frac{(X_{r,e} - X_{r,r})^2 + (X_{i,e} - X_{i,r})^2}{X_{r,r}^2 + X_{i,r}^2}} \quad (1)$$

V članku obravnavamo 6 različnih algoritmov: 4PSF (angl. *four Parameter Sine Fit*) [3], iDFT (angl. *interpolated DFT*), SLCA (angl. *Spectrum Leakage Correction Algorithm*) [4], PSFE in PSFEi (angl. *interpolated Phase Sensitive Frequency Estimation*) [5] in MHFE (angl. *Multi Harmonic Frequency Estimation*) [6]. Skupni parametri v obravnavanem članku so $A = 1$ p.e., $f = 50$ Hz in $\varphi = 0$ rad. Vse morebitne variacije od teh vrednosti so v članku jasno navedene.

3 Rezultati

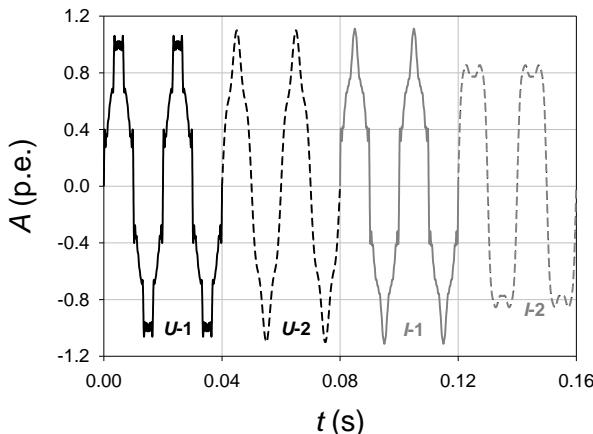
Pri osnovnem harmonskem testu je potrebno osnovnemu signalu ($A = 1$ p.e., $f = 50$ Hz, $\varphi = 0$ rad)



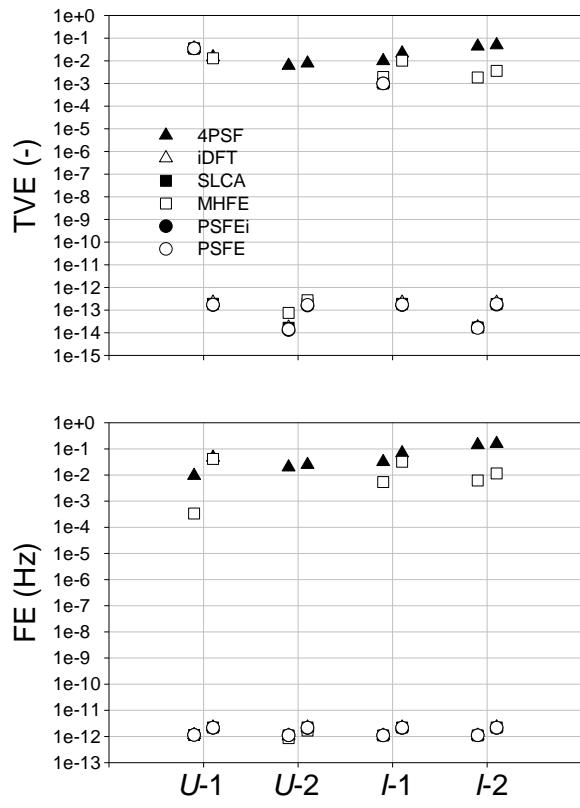
Slika 1. TVE in FE različnih algoritmov ob prisotnosti različnih harmonik z amplitudo 0.1 p.e. Frekvenca vzorčenja je 1 kHz.

dodati harmonsko komponento z amplitudo 0.1 p.e. [2]. Testirati je potrebno prvih 50 harmonskih komponent, s standardom predpisane meje pa so $TVE < 1\%$ in $FE < 5\text{ mHz}$.

Rezultati simulacij osnovnega harmonskoga testa pri $f_s = 1\text{ kHz}$ so prikazani na sliki 1. FE algoritmov 4PSF in MHFE pogosto in periodično presežejo mejne vrednosti [1]. Izjeme so le posamezni harmoniki okoli



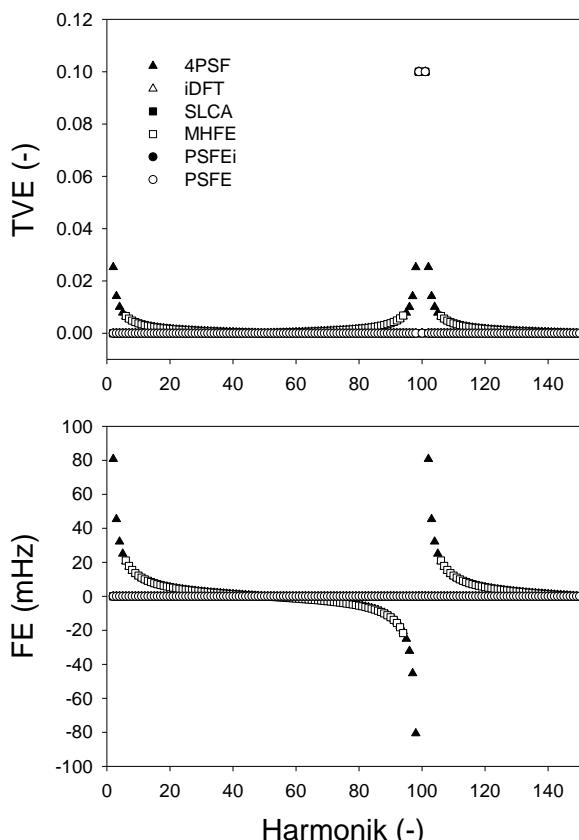
Slika 2. Obravnavani realistični harmonsko popačeni napetostni ($U-1$ in $U-2$) in tokovni ($I-1$ in $I-2$) signali. Amplituda in frekvenca osnovnega signala sta $A = 1\text{ p.e.}$ in $f = 50\text{ Hz}$. Signali so bili vzeti iz ref. [7].



Slika 3. TVE in FE realističnih harmonsko popačenih signalov $U-1$, $U-2$, $I-1$ in $I-2$ iz ref. [7]. Frekvenca vzorčenja je 1 kHz (simboli levo) ali 5 kHz (simboli desno).

vsake 10 komponente (tj. 9-11, 20, 29-31, 40, 49-51, itd.), kjer je vrednost FE (blizu) 0 mHz. Velike so tudi TVE obeh algoritmov. MHFE algoritmom se meji $TVE = 1\%$ občasno približa, medtem ko 4PSF algoritmom to mejo občasno močno preseže. Zaradi velikih napak ta dva algoritma nista primerna za uporabo v merilnikih PMU [1]. Slika 1 tudi razkriva, da imajo vsi algoritmi $TVE = 0\%$ za 20 in 40 harmonik. Ta harmonika sta vzorčena le ob ničelnih vrednostih, zato po vzorčenju ostane le osnovna harmonska komponenta, ki jo pravilno določijo vsi algoritmi. Nasprotno velja za $n \times f_s/f_0 \pm 1$ harmonike, kjer n označuje poljubno celo število in f_0 sistemsko frekvenco, tj. 50 Hz. V teh primerih se zgodi frekvenčno prekrivanje (angl. aliasing), zato po vzorčenju takega harmonsko popačenega signala dobimo navidezno nepopačen sinusni signal s frekvenco 50 Hz in amplitudo 0.9 p.e. ali 1.1 p.e. Pri takšnem harmonskem popačenju noben algoritmom ne zna podati pravilne ocene osnovnega signala in napaka vseh algoritmov je $TVE = 10\%$.

Da bi potrdili zgornji zaključek, smo testirali tudi štiri realne harmonsko popačene signale (slika 2). Signali so bili vzeti iz internetne baze metrološkega instituta NPL [7], rezultati simulacij in napake algoritmov pri $f_s = 1\text{ kHz}$ pa so prikazani na sliki 3 (simboli levo).



Slika 4. TVE in FE različnih algoritmov ob prisotnosti različnih harmonik z amplitudo 0.1 p.e. Frekvenca vzorčenja je 5 kHz.

Napaka algoritmov 4PSF in MHFE je vedno relativno visoka. Po drugi je lahko napaka TVE ostalih algoritmov primerljiva z napakama 4PSF ali MHFE algoritmov (*U-1, I-1*) ali je napaka zelo majhna in je celo na nivoju numeričnih napak (*U-2, I-2*). Podrobnejša analiza signalov je razkrila, da vsebujejo signala *U-1, I-1* problematične harmonike, ki jih noben algoritmom ne ovrednotiti pravilno, zato so TVE napake v teh primerih podobne in velike.

Z vidika harmoniske analize pri $f_s = 1$ kHz noben algoritmom ne ustreza standardu [2], vendar obstajata dve praktični rešitvi. Pred vzorčenjem se lahko uporabi analogne nizko-prepustne ali pasovno-prepustne filtre, ki filtrirajo problematične harmonike [1], a mora biti posebna skrb namenjena analizi časovne zakasnitve filtrov (tj. faz signal), saj izračun TVE (1) poleg amplitud vključuje tudi fazo. Druga rešitev temelji na povečanju frekvenca vzorčenja f_s , ki problematične harmonike premakne proti višjim frekvencom.

TVE in FE obravnavanih algoritmov pri testu z eno dodano harmonsko komponento in $f_s = 5$ kHz so prikazani na sliki 4. Slika je zelo podobna sliki 1, le da je frekvenčna os zaradi višje f_s ustrezno raztegnjena. Zato je pri 4PSF in MHFE algoritmih pri vsaki 50. komponenti (tj. 50., 100., itd.) vrednost FE (blizu) 0 mHz, medtem ko FE v okolici 2., 99., 101. komponente, itd. dosežejo maksimalno absolutno vrednost FE = 80 mHz oz. 20 mHz, tj. identično kot pri $f_s = 1$ kHz. Podobni zaključki veljajo tudi za TVE.

Zaradi višje f_s so tudi problematični harmoniki ustrezno premaknjeno proti višjim frekvencom in se sedaj prvič pojavijo šele pri 99. harmoniku. Za vse harmonike do 50. in za iDFT, SLCA, PSFEi in PSFE algoritme velja TVE < 1%, FE < 5 mHz, zato so ti algoritmi sedaj primerni za uporabo v PMU.

Da bi verificirali zaključke, smo ponovili simulacije realističnih harmonsko popačenih signalov pri $f_s = 5$ kHz (slika 3, desni simboli). Po pričakovanjih postane TVE in FE vse štiri realistične signale zanemarljivo majhna za iDFT, SLCA, PSFEi in PSFE algoritme. Po drugi strani se lahko TVE in FE od 4PSF in MHFE algoritmov bodisi zveča ali zniža, saj prisotni harmoniki pri $f_s = 5$ kHz povzročajo večje ali manjše napake v primerjavi s $f_s = 1$ kHz (sliki 1 in 4). Vseeno so napake teh dveh algoritmov v primerjavi z ostalimi znatno večje, zato algoritma 4PSF in MHFE nista najbolj primerna za uporabo v merilnikih PMU glede na opravljeno harmonsko analizo.

4 Zaključek

V članku analiziramo delovanje šestih algoritmov za uporabo v merilnikih fazorjev (PMU). Algoritma 4PSF in MHFE sta manj primerna, saj njun FE (in TVE) presega mejne vrednosti ne glede na frekvenco vzorčenja f_s . Pri $f_s = 1$ kHz se pri vseh algoritmih pri določenih harmonikih pojavi frekvenčno prekrivanje, zato noben algoritmom ne ustreza specifikacijam standarda. Pri višjih frekvencah vzorčenja $f_s = 5$ kHz ostajajo maksimalne absolutne TVE in FE algoritmov 4PSF in MHFE nespremenjene, medtem ko so se »problematični« harmoniki premaknjeni proti višjim frekvencom, zato postanejo iDFT, SLCA, PSFEi in PSFE algoritmi primerni za uporabo v merilnikih PMU.

Zahvala

Raziskave so bile izvedene v okviru projekta EMRP JRP ENG52 Smart Grid II.

Literatura

- [1] Marko Berginc, Miha Kokalj, Rado Lapuh, Boštjan Voljč, Borut Pinter, Matjaž Lindič, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* (2016) poslano v objavo
- [2] IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems Amendment 1: Modification of Selected Performance Requirements, IEEE Std. C37.118.1a-2014
- [3] IEEE Standard for DigitizingWaveform Recorders, IEEE Std. 1057-2007, 2008
- [4] T. Radil, P. M. Ramos, A. C. Serra, , *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **58** (2009) 1670
- [5] R. Lapuh, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **64** (2015) 1419
- [6] R. Pintelon, J. Schoukens, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **45** (1996) 588
- [7] NPL Power Quality Waveform Library, <http://resource.npl.co.uk/waveform/>

Odziv algoritmov za merilnik fazorjev za različne harmoniske popačene signale

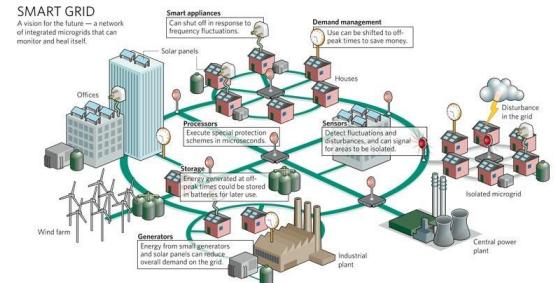
Marko Berginc, Miha Kokalj, Rado Lapuh, Boštjan Voljč,
Borut Pinter, Matjaž Lindič
SIQ Ljubljana

25. mednarodna Elektrotehniška in računalniška konferenca
ERK 2016, Portorož, 2016



Vsebina predavanja

- klasična in pametna omrežja



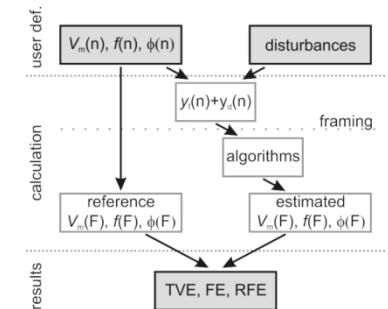
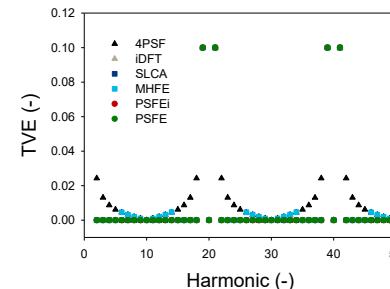
- merilniki PMU

- platforma za testiranje algoritmov za PMU merilnike

- rezultati harmonske analize:

popačenja z eno harmonsko komponento pri $f_s = 1 \text{ kHz}$ in 5 kHz

- zaključki



Klasično električno omrežje

Značilnosti

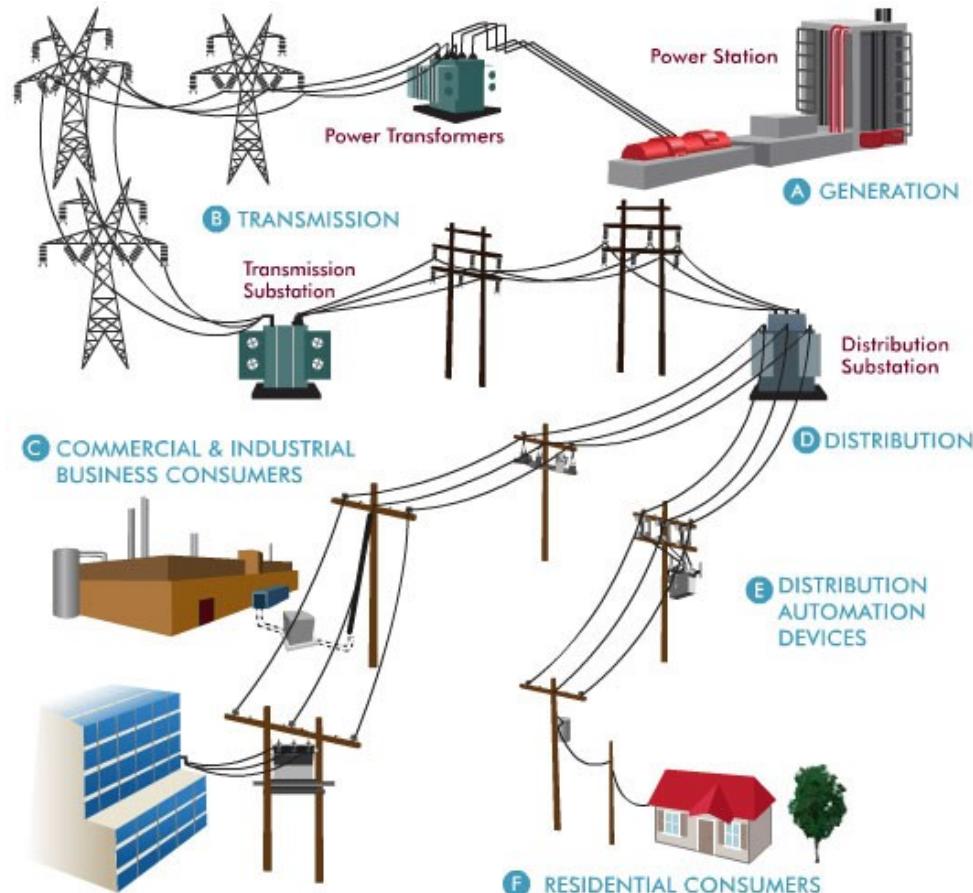
- Na eni strani proizvajalci
 - hidroelektrarne
 - termoelektrarne
 - jedrske elektrarne

Proizvodnja predvidljiva.

- Na drugi strani porabniki
 - gospodinjstva
 - industrija
 - komercialni porabniki

***Porabniki enostavni,
enostavna nespremenljiva bремена***

- Električno omrežje
 - prenos energije samo v eno smer
(od elektrarn do porabnikov)
 - enostaven nadzor omrežja



Alternativni viri energije

Cilji EU do leta 2020 (zaveza 20-20-20)

- proizvodnja energije iz obnovljivih virov 20%
- zmanjšanje CO₂ za 20%
- zmanjšanje porabe energije za 20%

Značilnosti

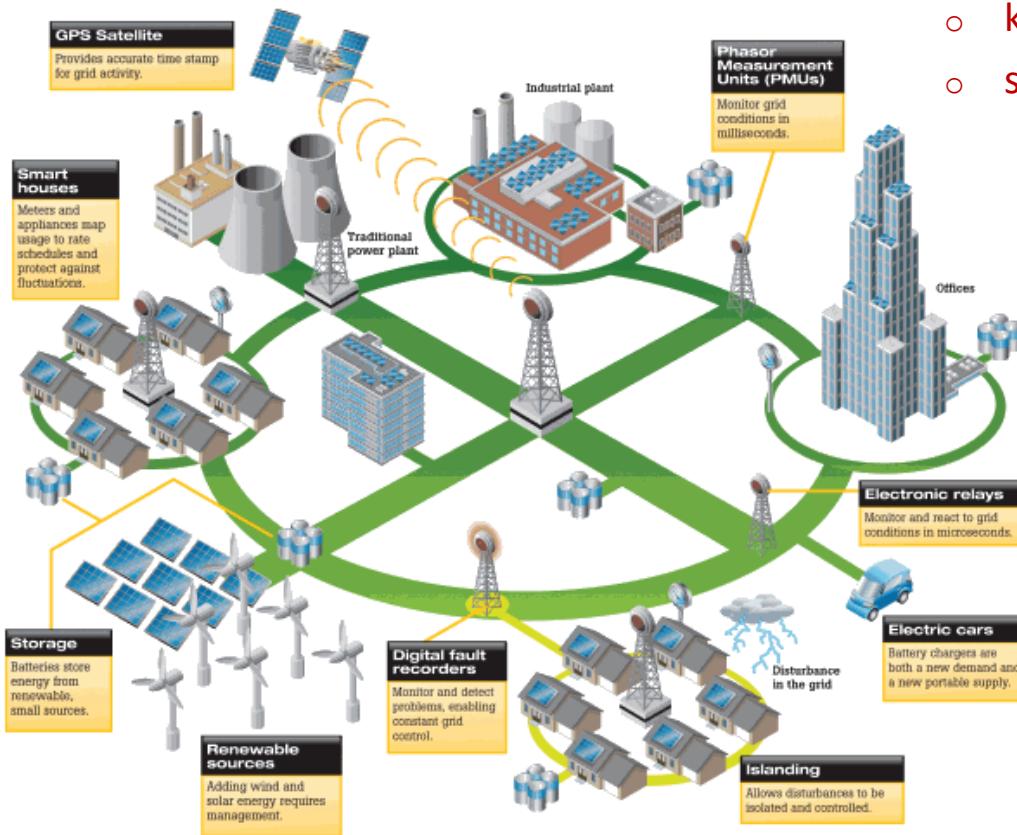
- razpršeni viri energije
- zahtevnejši način upravljanja in obvladovanja omrežja



Pametno omrežje - Smart Grid

Značilnosti

- velike elektrarne + lokalni viri energije
- razpršenost virov energije
- kompleksni porabniki
- pretok energije v obe smeri
- potrebni dodatni in izpopolnjeni mehanizmi za zagotavljanje:
 - kvalitete energije (Power Quality)
 - stabilnosti omrežja



PMU (Phasor Measurement Unit)

- PMU uporablja se v energetskem sistemu za merjenje A (U in I), f in φ ob znanih časovnih intervalih
(IEEE Std. C37.118.1a-2011)
- omogoča
 - primerjavo in usklajevanje podatkov iz posameznih PMU naprav v realnem času, ker je sistem sinhroniziran na GPS čas
 - nadzorovanje razmer na različnih delih omrežja v realnem času
 - hitro in učinkovito ukrepanje ob nepravilnostih, da ne pride do izpada omrežja



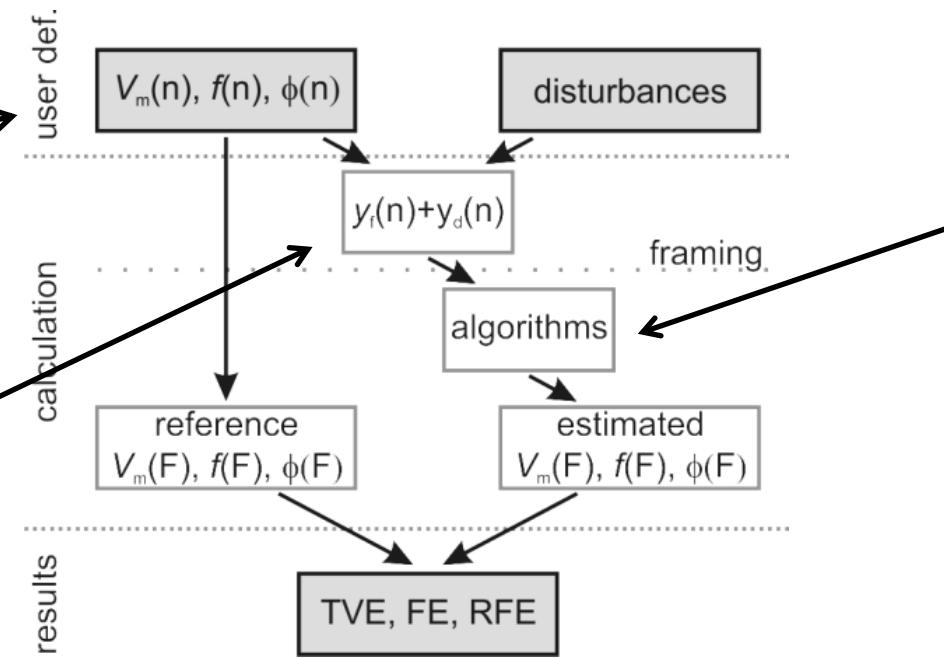
Platforma za simulacije

Osnovni signal

- $A = 1$ p.e.
- $f_0 = 50$ Hz
- $\varphi = 0$ rad

Vzorčenje

- $f_s = 1$ kHz
- $F_s = 10$ Hz



Napaka vektorja TVE:

- $X_{r,e}, X_{i,e}$ realna in imaginarna komponenta ocene fazorja
- $X_{r,r}, X_{i,r}$ realna in imaginarna komponenta referenčne vrednosti fazorja

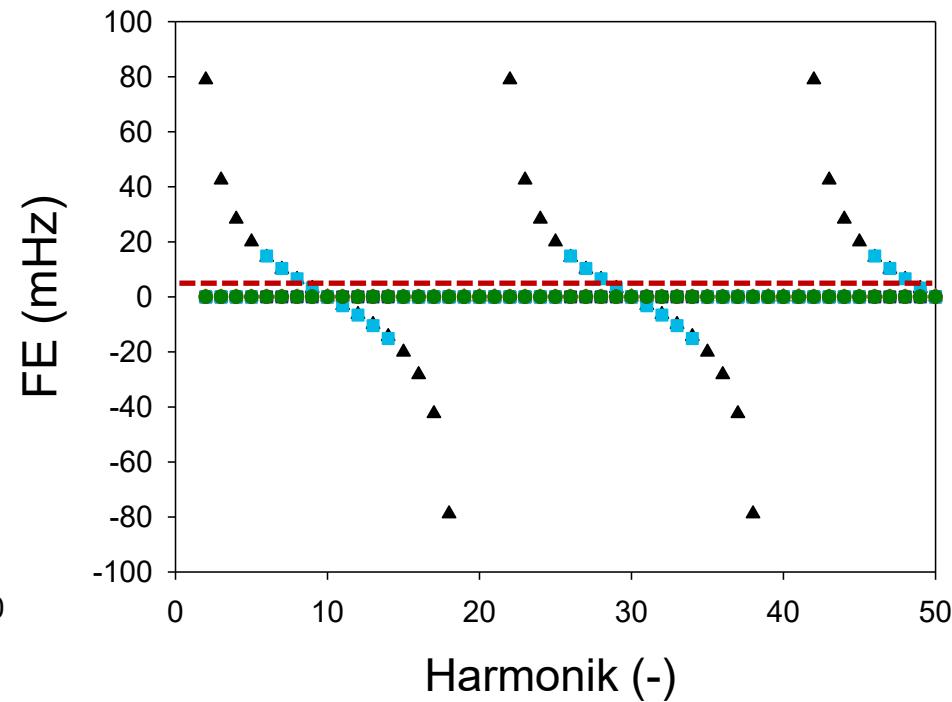
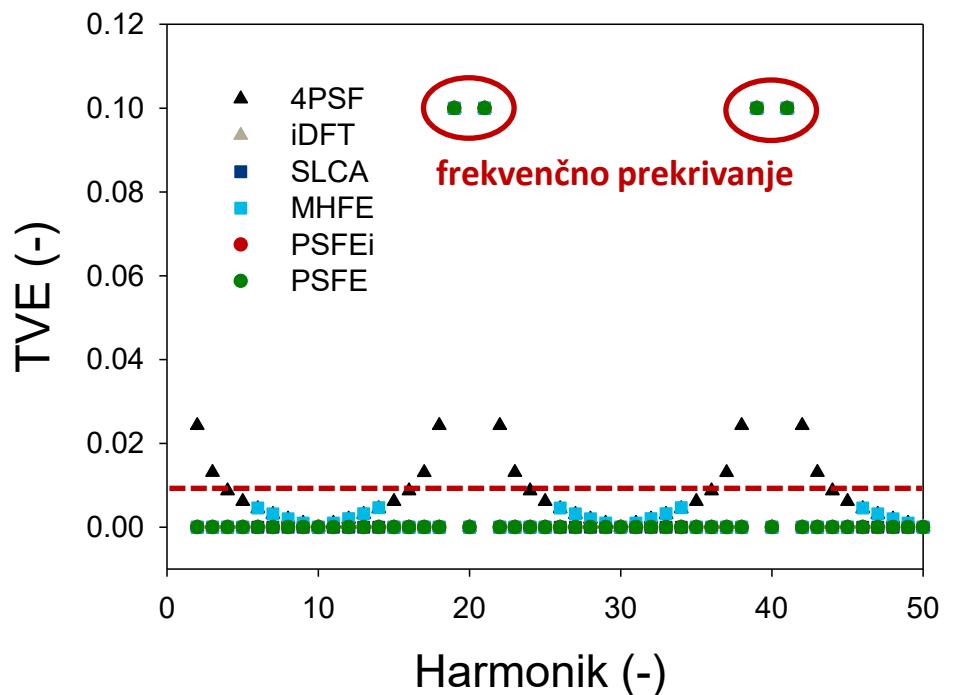
$$TVE = \sqrt{\frac{(X_{r,e} - X_{r,r})^2 + (X_{i,e} - X_{i,r})^2}{X_{r,r}^2 + X_{i,r}^2}}$$

Napaka frekvence FE

- f_r, f_e referenčna in ocenjena vrednost frekvence

$$FE = f_r - f_e$$

Popačenja z enim harmonikom / 1 kHz



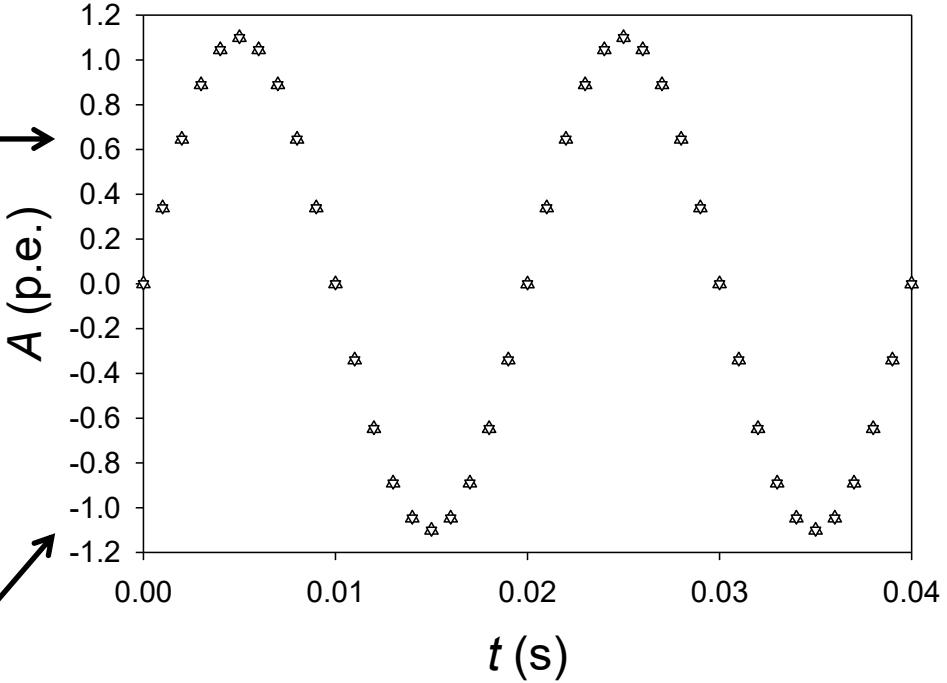
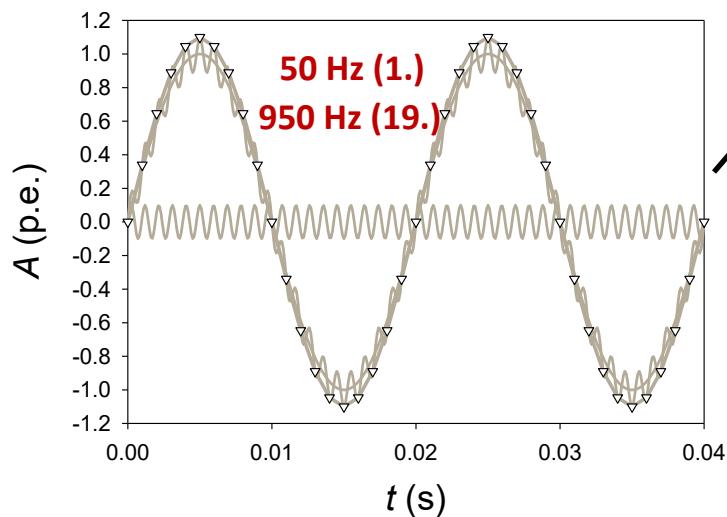
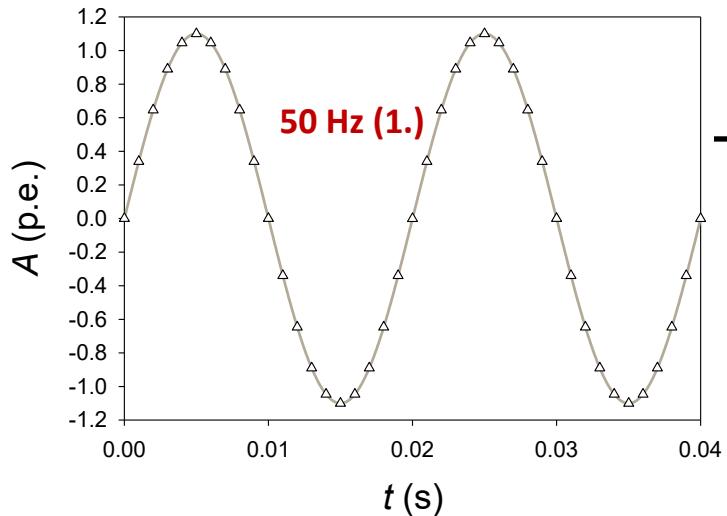
Signal: osnovnemu signalu se doda en harmonik (2.–50. komponenta) z amplitudo $A_h = 0.1$ p.e.

Mejne vrednosti: TVE < 1%, FE < 5 mHz

4PSF in MHFE: mejne vrednosti za TVE in FE so občasno presežene

vsi algoritmi: frekvenčno prekrivanje za $n \times f_s/f_0 \pm 1$ harmonike

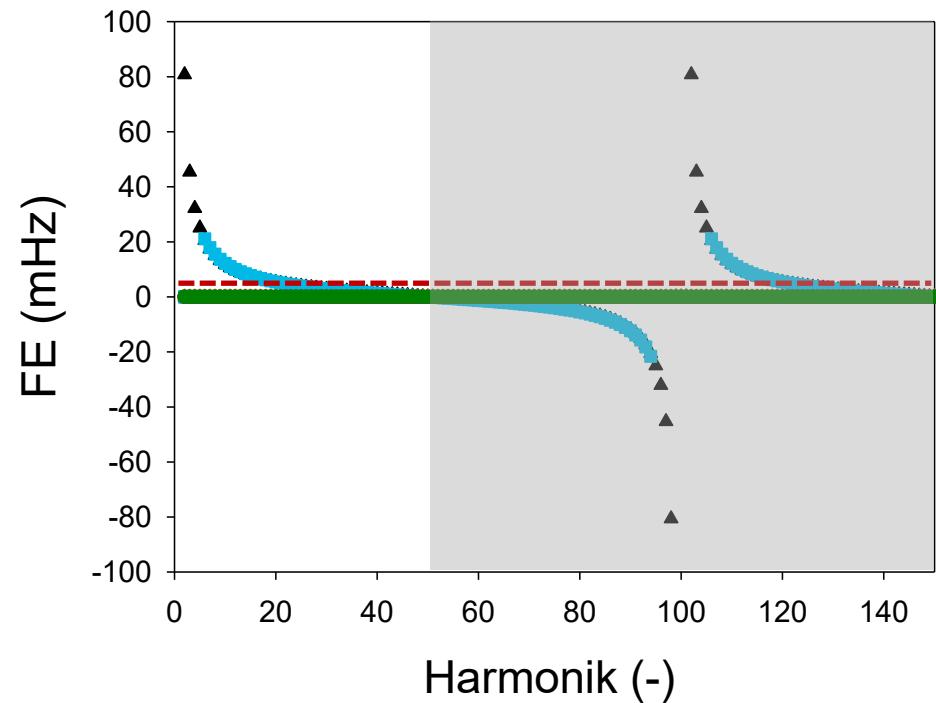
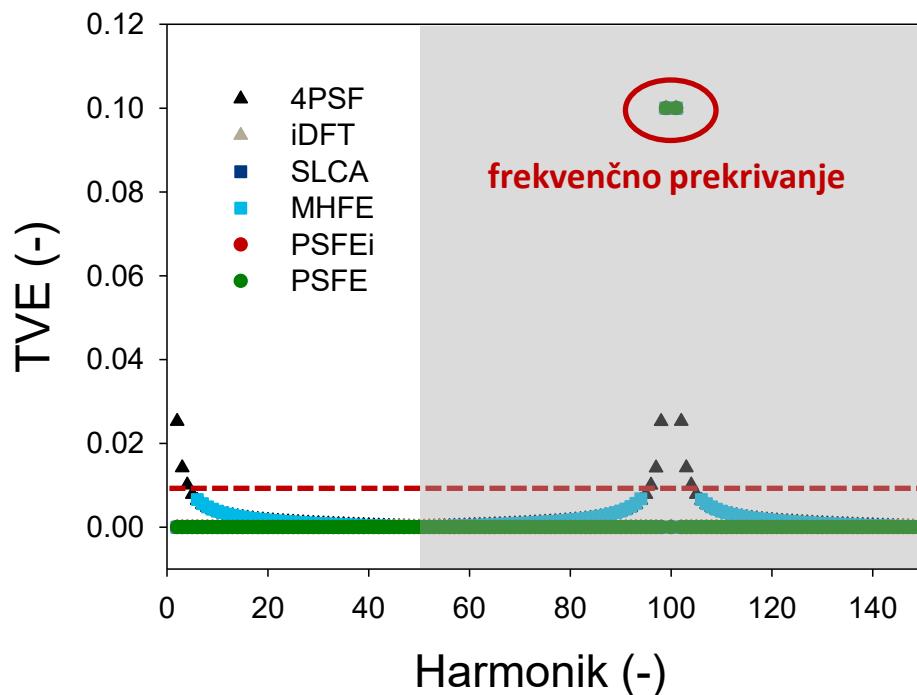
Frekvenčno prekrivanje



Po vzorčenju obeh signalov dobimo iste vrednosti

- uporaba analognih (ne digitalnih !!!) nizkoprepustnih ali pasovno prepustnih filterov → časovna zakasnitev
- višja f_s

Popačenja z enim harmonikom / 5 kHz



Signal: osnovnemu signalu se doda en harmonik (2.–50. komponenta) z amplitudo $A_h = 0.1$ p.e.

Mejne vrednosti: TVE < 1%, FE < 5 mHz

Podoben odziv kot pri $f_s = 1$ kHz, le da je frekvenčna os raztegnjena

4PSF in MHFE: enake TVE in FE kot pri $f_s = 1$ kHz (le pri drugih f)

vsi algoritmi: ni frekvenčnega prekrivanja do 50. harmonika

Zaključki

- analizirali smo delovanje šestih algoritmov za uporabo v merilnikih PMU
- algoritma **4PSF** in **MHFE** sta neprimerna: **mejne vrednosti TVE in FE so presežene ne glede na f_s**
- pri $f_s = 1$ kHz se pri vseh algoritmih pri določenih harmonikih pojavi frekvenčno Prekrivanje (**noben algoritem ne ustreza specifikacijam standarda**)
- priporočljiva je uporaba analognih filtrov (časovna zakasnitev) in/ali višja f_s
- pri $f_s = 5$ kHz se frekvenčno prekrivanje pojavi pri višjih f , zato postanejo **iDFT**, **SLCA**, **PSFEi** in **PSFE** algoritmi primerni za uporabo v PMU
- **glede na opravljene analize se je PSFE algoritem izkazal za najprimernejšega za uporabo v merilnikih PMU**

Meroslovje za zeleno prihodnost

Hvala za pozornost



EMRP
European Metrology Research Programme
► Programme of EURAMET



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



The EMPIR initiative is co-funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and the EMPIR Participating States

