

Merjenje parametrov kvalitete omrežja

Boštjan Voljč, Matjaž Lindič, Rado Lapuh

Slovenski institut za kakovost in meroslovje (SIQ), Tržaška cesta 2, 1000 Ljubljana, Slovenija
bostjan.voljc@siq.si

Measurement of power quality parameters

The paper describes the measurement procedure for calibration of power quality parameters using asynchronous sampling technique with multi harmonic sine fit algorithm to separately determine harmonics, interharmonics, fluctuating harmonics and flickers.

Power quality (PQ) measurements and related instrumentation became increasingly important in recent years. The calibration laboratories were faced with new calibration requirements, requiring traceability beyond capabilities of classical ac measurement techniques, typically employing thermal voltage converters. As individual PQ parameters from complex waveforms needed to be measured, a sampling systems accompanied with required signal processing were used.

A measurement of arbitrary complex PQ phenomena can't be performed on the highest performance level of the laboratory, but an isolated parameter calibration using synchronously generated and coherently sampled system [1] offer traceability and uncertainty at such level.

As described in paper [1], the synchronous sampling technique requires highly elaborated measuring system setup when using commercially available instrumentation for calibrating generated PQ parameters. Further, the technique described requires a coherent sampling for all signals components which is possible for only a limited set of signal frequencies and their combinations. They should be determined and written in PQ parameters calibration protocol. While synchronous technique gives excellent results, it is fairly limited due to complex measurement setup.

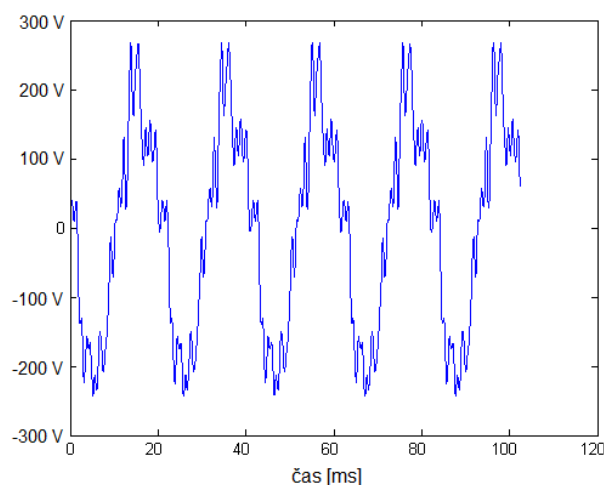
In this paper, this technique is extended to asynchronously sampled PQ parameter calibration using a forced initial frequency estimate for used multi harmonic sine fit algorithm, which greatly simplifies measurement system, extends possible signal parameter combinations and provides an excellent method for traceable calibration of highest accuracy PQ calibrators.

1 Uvod

Merjenje parametrov kvalitete omrežja (PQ parametri) in s tem povezani instrumenti postajajo v zadnjem času vedno bolj pomembni. Posledično se kalibracijski laboratoriji srečujejo z novimi kalibracijskimi zahtevami na tem področju, ki zahtevajo sledljivost izven okvirov merjenja klasične izmenične napetosti.

Merjenje izmenične napetosti namreč temelji na uporabi termalnih napetostnih pretvornikov, merijo pa se čisti sinusni signali do frekvenc 1 MHz. Pri merjenju parametrov kvalitete moči (harmonske komponente, harmonsko popačenje, interharmoniki, flikerji, skoki in upadi napetosti) pa je potrebno določiti posamezne parametre iz kompleksnih in nečistih signalov, za kar je potreben sistem za vzorčenje signalov s kvalitetnim matematičnim algoritmom. Ta mora omogočati dovolj natančno določitev posameznih parametrov iz vzorčenega kompleksnega signala, da lahko ovrednotimo merilnik ali generator PQ parametrov.

Medtem, ko merjenje kompleksnih signalov na električnih omrežjih ne more doseči najboljših zmogljivosti laboratorija, se lahko z uporabo sistema za vzorčenje določi posamezne parametre kvalitete omrežja [1] z merilno negotovostjo na najvišjem nivoju, ki zadostuje za pokritje kalibracij merilnikov kvalitete omrežja ter kalibratorjev za te merilnike.



Slika 1: Primer kompleksnega signala na električnih omrežjih

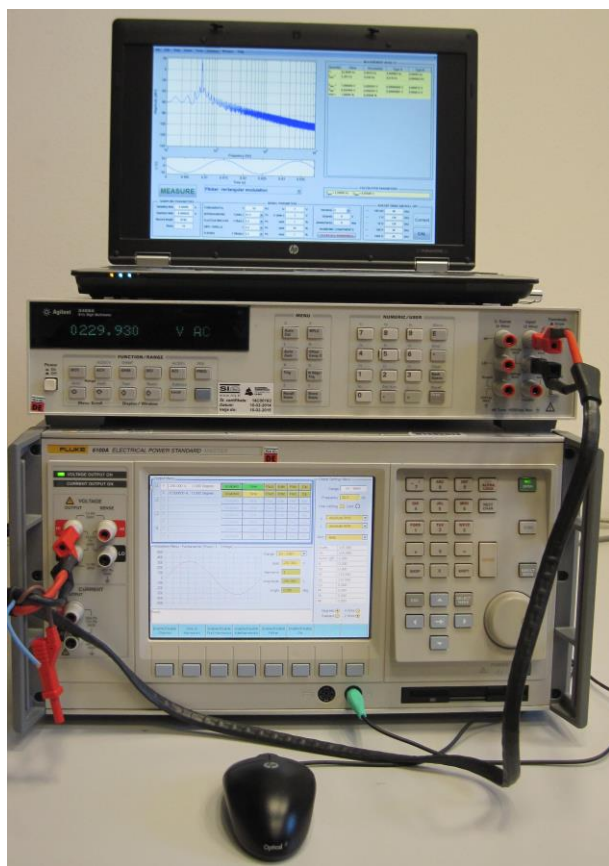
V članku [1] je opisano, da potrebuje metoda sinhronnega vzorčenja natančno izdelan merilni sistem, ki je sestavljen iz komercialno dobavljive merilne opreme. Poleg tega je pri opisani metodi za zagotovitev nizke merilne negotovosti potrebno, da je vzorčenje koherentno, kar pa je možno le pri omejenem številu osnovnih frekvenc signala. Te frekvence je potrebno določiti in zapisati v kalibracijski protokol za kalibracijo parametrov kvalitete omrežja. Metoda sinhronnega vzorčenja tako omogoča zelo dobre merilne rezultate, vendar pa je omejena zaradi kompleksnega merilnega mesta ter frekvenčne omejenosti.

V nadaljevanju članka je tako metoda sinhronnega vzorčenja razširjena v kalibracijo parametrov kvalitete

omrežja z asinhronim vzorčenjem, ki uporablja vsiljeno začetno določitev frekvence ter v nadaljevanju algoritem MHFE (Multi Harmonic Sine Fit), kar zelo poenostavi merilni sistem, razširi možne kombinacije merilnih parametrov ter zagotavlja osnovo za direktno kalibracijo kalibratorjev kvalitete omrežja na najtočnejšem nivoju, primerljivim z [1].

2 Merilni sistem za asinhrono vzorčenje

Merilni sistem za vzorčenje je sestavljen iz referenčnega vzorčevalnega digitalnega multimetra Agilent 3458A, ki je uporabljen za kalibracijo točnega generatorja parametrov kvalitete omrežja (npr. Fluke 6100A), kot je predstavljeno na Sliki 2.



Slika 2: Merilni sistem za kalibracijo generatorja PQ parametrov po asinhronski metodi

V primeru, da je amplituda merjene napetosti izven merilnih dosegov referenčnega digitalnega multimetra, se uporabi napetostni delilnik. V primeru merjenja izmeničnega toka, se uporabi primeren izmenični tokovni soupod, ki izmenični tok pretvori v izmenično napetost, primerno za vzorčenje.

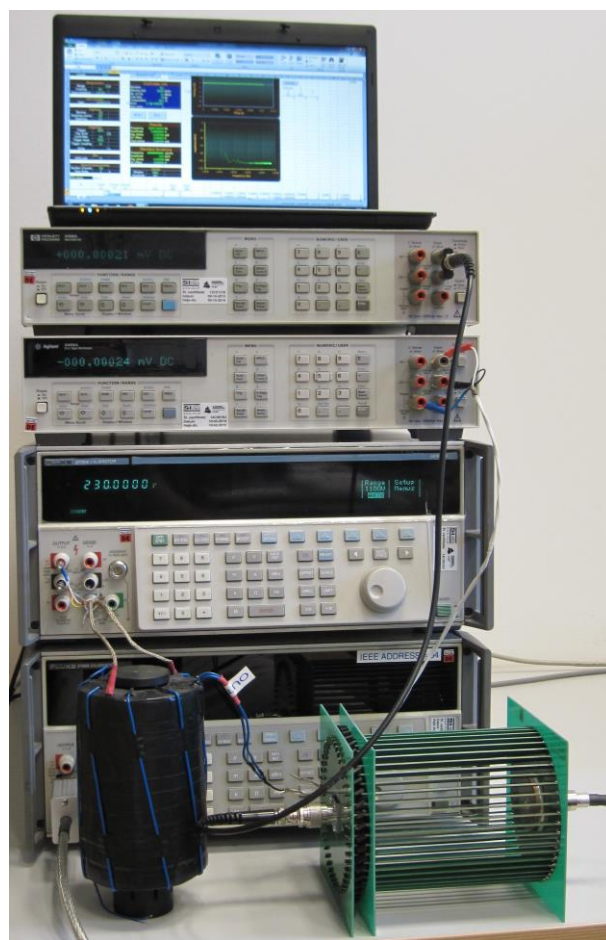
Vzorčevalni sistem ne potrebuje nobene sinhronizacije z generatorjem, ki ga kalibriramo. Za zagotovitev verodostojnega pokritja vseh signalov je vzorčevalni digitalni multimeter programsko nastavljen, da vzorči z vzorčevalno frekvenco 20 kHz, s časom odprtja 25 μ s. Pri tem multimeter zajame 8000 vzorcev, kar je 20 period osnovne frekvence signala, ki je pri merjenju na elektroenergetskih omrežjih 50 Hz.

Uporabljeni digitalni multimeter mora biti pred uporabo kalibriran na enosmernem področju in imeti korigiran čas odprtja (aperture) ter napako pasovne širine (bandwidth roll-off), ki lahko vpliva na merilno negotovost že pri frekvencah nad 200 Hz. Za zagotovitev najnižjih merilnih negotovosti do frekvence 6 kHz, (najvišja frekvenca, ki jo generira PQ generator Fluke 6100A), pa je potrebno opraviti še podrobnejšo karakterizacijo digitalnega multimetra [3]. Vsaka komponenta signala, ki je določena z algoritmom MHFE, je korigirana pred izračunom končnega rezultata.

3 Programski vmesnik za merjenje

Za namen vzorčenja različnih signalov ter njihove kasnejše analize je bil razvit programski vmesnik v programskem okolju MatLab. Programski vmesnik omogoča komunikacijo z merilno opremo, ki se kalibrira ter predvsem z vzorčevalnimi digitalnimi multimetri Agilent 3458A (ali HP 3458A), s katerimi se vzorčijo signali. Vmesnik omogoča uporabo enega ali istočasno uporabo dveh digitalnih multimetrov za vzorčenje enega ali dveh signalov.

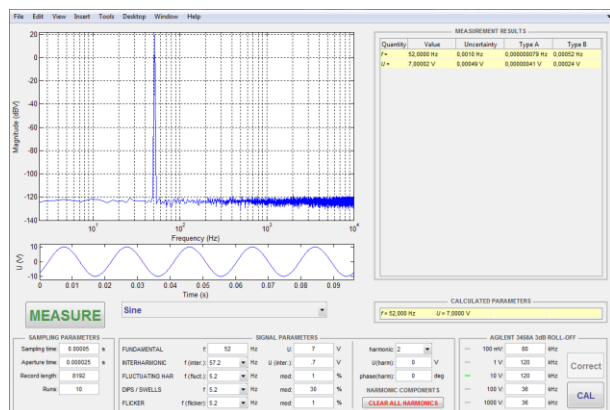
Programski vmesnik tako omogoča poleg merjenja parametrov kvalitete omrežja tudi kalibracijo merilnega sistema za tok in napetost (Slika 3).



Slika 3: Merilni sistem za kalibracijo napetosti in toka z uporabo vzorčevalnih digitalnih multimetra Agilent 3458A

Poleg tega programski vmesnik omogoča analizo naslednjih vzorčenih PQ signalov:

- sinusni signal,
- harmonsko popačen signal (do vključno 100 harmonikov simultano),
- interharmonsko popačen signal,
- sinusno modulirani nihajoči harmonik,
- pravokotno moduliran nihajoči harmonik,
- začasni padci in dvigi napetosti,
- sinusno moduliran fliker,
- pravokotno moduliran fliker.



Slika 4: Programski vmesnik za kalibracijo PQ parametrov ter kalibracijo merilnega sistema, med merjenjem parametrov sinusnega signala.

4 Metoda asinhrona vzorčenja

Za natančno določitev parametrov signala, ki je bil vzorčen z asinhrono metodo, je uporabljen algoritem MHFE. Ta algoritem lahko simultano določi vse harmonske parametre vzorčenega signala, ki pa morajo biti harmonsko povezane.

V primeru harmonsko nepovezanih signalov je za pravilno delovanje MHFE algoritma potrebno preračunati pripadajočo nizko frekvenco, na katero so vse komponente harmonsko navezane. Na ta način se zagotovi začetna frekvenca, ki jo algoritem MHFE uporabi kot prvi približek in na njeni podlagi določi točno frekvenco ter vse ostale parametre. Izračun PQ parametrov in pripadajočih merilnih negotovosti ostaja nespremenjen, kot je bilo razloženo v [1], kar sloni na točni določitvi amplitud individualno vzorčenih spektralnih komponent.

4.1 Merjenje interharmonikov

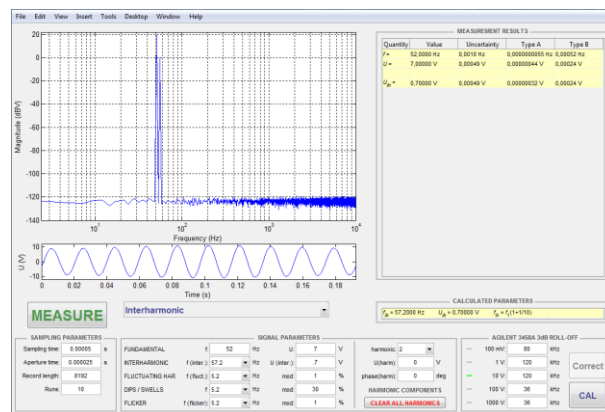
Pri uporabi algoritma MHFE za merjenje signala, ki vsebuje interharmonike, je vsaka interharmonska frekvenca določena kot

$$f_i = f_1 \cdot (h + q/M) \quad (1)$$

kjer je f_1 osnovna frekvenca signala, h je celo število, ki označuje številko harmonika, M je majhno celo število (npr. $M = 5$) ter q celo število ($q \leq M - 1$).

Predvidevamo, da ima osnovni signal, četudi ni prisoten, frekvenco f_1/M in posledično so vse spektralne

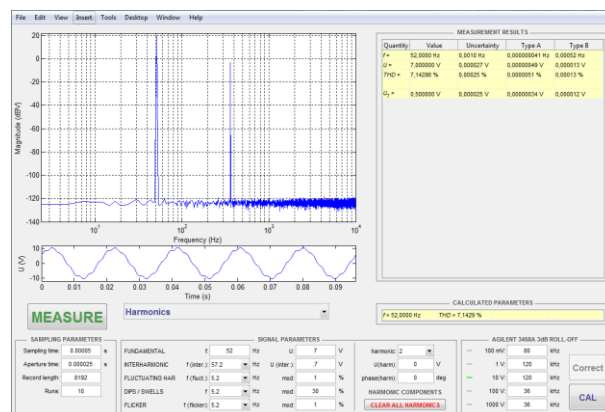
komponente harmonsko povezane. Začetna osnovna frekvenca za algoritem MHFE ni določena avtomatično (z npr. interpoliranim DFT algoritmom), ampak je določena direktno kot $f = f_1/M$. Nato algoritem MHFE izvede določitev frekvence samo na osnovi harmonskih komponent, ki so prisotne v signalu. Hkrati algoritem določi tudi posamezne amplitude in faze za vse harmonske komponente v merjenem signalu.



Slika 5: Določitev interharmonskih komponent. Frekvenca osnovnega signala je 52 Hz, frekvenca interharmonika pa 57.2 Hz.

4.2 Merjenje sinusnega signala ter višjih harmonikov

Merjenje harmonskih komponent je enako merjenju sinusnega signala. Pomembno je, da je vzorčevalna frekvenca dovolj visoka, da so zajete vse harmonske komponente v signalu.



Slika 6: Določitev harmonskih komponent

4.3 Sinusno moduliran fliker in nihajoči harmoniki

V primeru, da so osnovne komponente signala (npr. flikerji) ali harmonske komponente (nihajoči harmoniki) modulirane s sinusno funkcijo frekvence f_{mod} , se okrog harmonskih komponent generirajo stranski pasovi pri frekvencah $f_h - f_{mod}$ in $f_h + f_{mod}$.

Kadar je f_{mod} določen kot

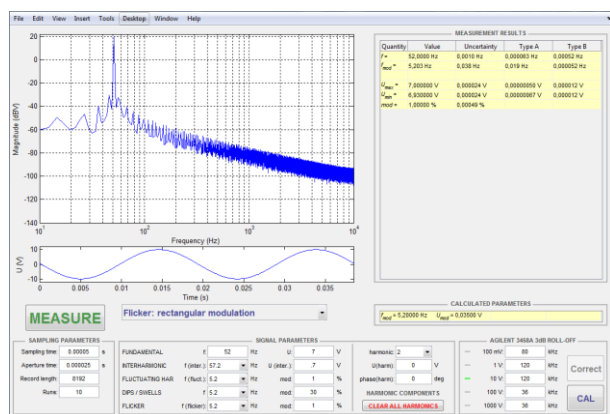
$$f_{mod} = f_1 \cdot q/M \quad (2)$$

in sta M in q majhni celi števili in $q \leq M - 1$, so vse harmonske komponente povezane kot $f = f_i/M$ in posledično lahko MHFE algoritem optimalno določi merjene amplitude.

4.4 Pravokotno moduliran fliker in nihajoči harmoniki

Pri merjenju pravokotno moduliranega signala je možno uporabiti dva različna pristopa [1]. Prvi pristop zahteva merjenje zelo dolgih serij harmonskih komponent, kar pri sinhronem merjenju z uporabo FFT vedno prinese dodatne napake zaradi prekrivanja (aliasing). Te je možno zmanjšati z uporabo asinhronnega vzorčenja ter algoritma MHFE, in to tudi pri frekvencah, višjih od Nyquistove frekvence, saj algoritem pod določenimi pogoji lahko ustrezno ovrednoti tudi spektralno preslikane harmonske komponente [2].

Drugi pristop je uporaba pravokotnih oken v časovnem prostoru. Kadar se uporablja algoritem MHFE, izbira dolžine okna ni kritična, dokler sta vzorčeni vsaj dve periodi signala pri najnižji frekvenci. Ta pristop je uporabljen tudi v programskem vmesniku, kjer je bil razvit poseben algoritem za določitev ustreznih oken, ki pokrivajo le stabilni signal v enem ali drugem delu pravokotne modulacije.



Slika 7: Določitev flikerja pri pravokotni modulaciji z uporabo pravokotnih oken. Spekter signala ne omogoča izvedbe meritve v frekvenčnem prostoru.

4.5 Merilna negotovost

Merilna negotovost je definirana za pogoje, ki so predpisani, za generiranje individualne signale kvalitete omrežja ter pri vzorčenju dovolj period signala. Odvisna je od digitalnega vzorčevalnega multimetra (od točnosti korekcije ojačanja vhodne stopnje, od točnosti korekcije pasovne širine, točnosti korekcije časa odprtja (aperture) ter korekcije zaradi disipacijskega faktorja) in stabilnosti generatorja parametrov kvalitete omrežja.

V spodnji tabeli so predstavljene merilne negotovosti za asinhroni vzorčevalni merilni sistem, kadar se kalibrira generator parametrov kvalitete omrežja s sledečimi podatki: $f_1 = 52$ Hz, $A_1 = 10$ V, $t_a = 25$ μ s, $t_s = 50$ μ s in $N = 8192$.

PQ parameter	ocenjeno	negotovost ($k = 2$)	Ah [V]	h	q	M
harmonska popačenja	HD = 1%	0.0004%	0.1	3		
interharmonska popačenja	IHD = 1%	0.0004%	0.1	3	2	5
nihajoči harmoniki	$m = 0.1$	0.0006	1	3	1	5
flikerji	$m = 0.1$	0.00006			1	5

Tabela 1: Merilna negotovost za različne parametre kvalitete omrežja, določene z asinhrono metodo ter algoritmom MHFE

5 Zaključek

Kalibracija parametrov kvalitete omrežja na najvišjem nivoju, ki jo zahtevajo najtočnejši PQ generatorji, je izvedena z uporabo metode asinhronnega vzorčenja. Z MHFE algoritmom za določitev PQ parametrov iz vzorčenega signala je možno doseči merilne negotovosti v razredu nekaj ppm. MHFE algoritem potrebuje striktno harmonsko povezane komponente signala, kar se lahko pri nekaterih signalih izkaže za problem. Zaradi tega se to metodo uporablja pri omejenem obsegu osnovnih frekvenc in izbrani kombinaciji ostalih komponent signala za zagotovitev merilne negotovosti na najvišjem nivoju.

Literatura

- [1] R. Iuzzolino and W. G. K. Ihlenfeld, "High-Accuracy Methods and Measurement Procedures for Power Quality Parameters Using the Digital Synchronous Sampling Technique", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 56, no. 2, pp. 426 – 430, April 2007.
- [2] 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.
- [3] R. Lapuh, B. Voljc and M. Lindic, "Accurate Measurement of AC Voltage in Audio Band Using Agilent 3458A Sampling Capability", CPEM 2014, August 2014.