



## AKTYVUSIS HARMONIKŲ KOMPENSAVIMAS SAULĖS ELEKTRINIŲ TINKLO INVERTERIAIS – ALGORITMŲ ANALIZĖ

Andrius Platakis

Vilniaus Gedimino technikos universitetas  
El. paštas [andrius.platakis@vgtu.lt](mailto:andrius.platakis@vgtu.lt)

**Santrauka.** Pateikta standartų, taikomų paskirstytosioms elektrinėms jungti į žemos įtampos elektros skirstomuosius tinklus, apžvalga. Išnagrinėtas aktyvusis harmonikų kompensavimo (AHK) aspektas, esantis šiuose standartuose. Pateikti harmonikų limitai, kuriuos turi atitikti jungiamos į žemos įtampos elektros tinklą paskirstytosios elektrinės. Apžvelgti skirtingi AHK metodai, pateikta kiekvieno algoritmo analizė. Atsižvelgiant į galimybę AHK įgyvendinti šiuo metu komerciškai gaminamuose saulės elektrinių tinklo inverteriuose (SETI), tarpusavyje palyginti skirtingi AHK pagal algoritmų skaičiavimo intensyvumą, daviklių skaičių, topologiją, maksimaliai kompensuojamų harmonikų skaičių ir priklausomybę nuo apkrovos tipo.

**Reikšminiai žodžiai:** saulės energija, saulės elektrinės tinklo inverteris (SETI), aktyvusis harmonikų kompensavimas.

### Įvadas

Paskirstytųjų elektrinių (PE) skaičius elektros energijos skirstomuosiuose tinkluose auga sparčiai. Didžioji dalis tokių elektrinių kaip pirminį energijos šaltinį naudoja atsinaujinančius energijos išteklius (AEI). Pagrindinis PE tikslas yra tiekti aktyviąją energiją į elektros tinklą priklausomai nuo pirminio energijos šaltinio galimybių. Tačiau PE gali ne tik suteikti galimybę naudotis nuolatinėmis elektros energijos atsargomis, bet ir padėti gerinti elektros tinklo energijos kokybę – sumažinti tinkle atsirandantį mirgėjimą, įtampos svyravimus, harmoninį iškraipymą ir spręsti kitas elektros energijos kokybės problemas (Geibel *et al.* 2009). Šiuo metu PE, kurios į elektros tinklus įjungtos per galios keitiklius (pvz.: saulės elektrinių tinklo inverteriai (SETI), vėjo jėgainės, kuro celės ir t. t.), yra laikomos trikdžių elektros tinkle šaltiniais. Jeigu galios keitikliai yra suprojektuoti tinkamai, jie gali padėti sumažinti elektros tinkle esančius trikdžius ir srovių harmoninius iškraipymus. Didžioji dalis šiuo metu rinkoje esančių inverterių yra tinkami vykdyti šias papildomas funkcijas.

### Problemos formulavimas

Dauguma standartų, taikomų prijungiant PE prie elektros tinklo, buvo surinkti ir sukurti prieš daug metų, kai PE skaičius buvo nedidelis ir jų įtaka elektros tinklui buvo maža. Tie patys standartai taikomi iki šiol, kai PE skaičius yra

labai padidėjęs. PE įtaka šiandien didėja sparčiai, todėl standartai yra keičiami ir pritaikomi siekiant išspręsti didėjantį PE kiekį elektros tinkle. Šiandien taikomi tokie standartai: IEEE-1547 (JAV) (IEEE 2003), IEC 61727 (Tarptautinis/Europa) (IEC 2004), IEC 61000-3-12 (Tarptautinis/Europa) (IEC 2011), DIN EN 61000-3-2 (Vokietija/Europa) (VDE 2010a), VDE-AR-N 4105 (Vokietija) (VDE 2010b). Šie standartai aprašo pagrindines taisykles ir nustato normas, kuriomis reikia vadovautis norint prijungti elektrinius įtaisus ir paskirstytąsias elektrines prie žemos įtampos elektros skirstomųjų tinklų. Standartuose taip pat aprašomi harmonikų, kurias gali generuoti elektriniai įtaisai, limitai (žr. 1 lentelę). Cituodami standartų IEEE-1547 (IEEE 2003) ir VDE-AR-N 4105 (VDE 2010b) teiginius, kad „nebus atsižvelgiama į harmoninių srovių tiekimą į tinklą dėl jau esamo įtampos harmoninio iškraipymo vietiniame elektros tinkle (angl. *Area Electric Power System*) be prijungtos paskirstytosios elektrinės“, galime teigti, jog PE nebūtinai turi tiekti į tinklą idealią sinuso formos srovę, kai tinklas veikia harmoninio iškraipymo sąlygomis. Šis faktas atveria galimybę inverteriais pagrįstas PE naudoti elektros tinklo kokybei gerinti. Viena iš vietų, kurioje tai būtų galima panaudoti, tai vietiniame elektros tinkle bendro jungimo taške (angl. *PCC – Point of Common Coupling*) – mažinti harmonines sroves (Mayr *et al.* 2007). Vienas iš būdų mažinti harmonines sroves saulės jėgainių tinklo inverteriais yra

aktyvūs galios filtravimas (angl. *Active Power Filtering*) arba aktyvūs harmonikų kompensavimas (angl. *Active Harmonic Compensation*). Papildomai įdiegus vieną iš tokių algoritmų į jau funkcionuojančius saulės jėgainių inverterius padidėtų jų vertė. Tai galima padaryti be didesnių inverterių aparatinės dalies modifikacijų. Papildomai reikalingas aukštesniųjų srovės harmonikų kompensavimo valdiklis ir tinkle tekančių srovių matavimas.

1 lentelė. Harmoninių srovių ribos PE

Table 1. Limits for harmonic current PE

| Harmonikos Nr.       | Dažnis, Hz | Riba nuo fundamentaliosios harmonikos, % |
|----------------------|------------|--|
| Nelyginės harmonikos |            |  |
| $3 \leq n \leq 9$    | 150–450    | 4,000                                    |
| $11 \leq n \leq 15$  | 550–750    | 2,000                                    |
| $17 \leq n \leq 21$  | 850–1050   | 1,500                                    |
| $23 \leq n \leq 33$  | 1150–1650  | 0,600                                    |
| $35 \leq n \leq 39$  | 1750–1950  | 0,300                                    |
| Lyginės harmonikos   |            |  |
| $2 \leq n \leq 10$   | 100–500    | 1,000                                    |
| $12 \leq n \leq 16$  | 600–800    | 0,500                                    |
| $18 \leq n \leq 22$  | 900–1100   | 0,375                                    |
| $24 \leq n \leq 34$  | 1200–1700  | 0,150                                    |
| $36 \leq n \leq 40$  | 1800–2000  | 0,075                                    |

### Aktyvieji harmonikų kompensavimo algoritmai

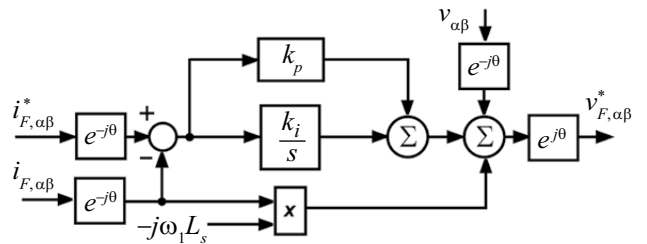
Harmoninių srovių valdymas gali būti įgyvendintas keliais metodais. Norint surasti tinkamiausią algoritmą, kuris galėtų būti įgyvendintas tipiniame SETI, buvo apžvelgti septyni skirtingi moksliniuose straipsniuose publikuoti aktyvieji harmonikų kompensavimo algoritmai. Turint omenyje tipinę SETI struktūrą (topologija, davikliai, skaičiuojamoji galia ir t. t.), kiekvienas išnagrinėtas kriterijus pateiktas 2 lentelėje straipsnio pabaigoje. Atsižvelgiant į tai, kad egzistuoja ne vienas algoritmas, galintis įgyvendinti aktyvųjų harmonikų kompensavimą, buvo apžvelgti šie didžiausią potencialą turintys AHK metodai:

- PI-SRF – proporcinis-integrinis valdiklis sinchroniškai besisukančioje atskaitos sistemoje (Bhattacharya *et al.* 2012);
- *Dead-Beat* – valdiklis stacionarioje atskaitos sistemoje (Lar *et al.* 2012);
- PI-SRF-MRI – PI-SRF valdiklis su keliais integratoriais (Lascu *et al.* 2009);
- P-SSI – proporcinis reguliatorius su sinusoidinių signalų integratoriais stacionarioje atskaitos sistemoje (Yuan *et al.* 2002);
- P-SSI-SRF – P-SSI valdiklis sinchroniškai besisukančioje atskaitos sistemoje (Bojoi *et al.* 2005);

- PI-SRF-RES – PI-SRF valdiklis su rezonansiniais reguliatoriais (Lascu *et al.* 2007; Xu *et al.* 2010);
- kartotinis valdiklis (Chen *et al.* 2013).

### PI-SRF valdiklis

Šis srovės valdiklis yra įgyvendinamas sinchroniškai besisukančioje ( $d, q$ ) atskaitos sistemoje, kurios sukimasis yra sinchronizuotas su bendro jungimo taško (PCC) įtampos vektoriumi. Supaprastinta PI-SRF valdiklio blokinė schema pateikta 1 pav. Tokia valdiklio struktūra dar turėtų būti papildyta atskyrimo (angl. *Decoupling*) ir pirminės nuostatos (angl. *Feed-forward*) blokais, kurie pagerintų valdiklio greitaveiką (Bhattacharya *et al.* 2012), nes atstojamosios komponentės harmonikoms kompensuoti yra kintantys laikė dydžiai sinchroniškai besisukančioje atskaitos ( $d, q$ ) sistemoje. Norint pasiekti nulinę nusistovėjusio proceso veikos klaidą (angl. *Zero Steady-state Error*) reikia, kad inverteris dirbtų aukštu diskretizavimo dažniu ir kad būtų plati valdiklio pralaidumo juosta.



1 pav. Supaprastinta PI-SRF valdiklio blokinė schema

Fig. 1. The basic block diagram of PI-SRF controller

### *Dead-Beat* valdiklis

DB valdiklyje algoritmas suskaičiuoja inverterio fazės įtampos komandą taip, kad būtų pašalintas esamas srovės klaidos signalas kito diskretizavimo periodo pabaigoje (Lar *et al.* 2012). Pirmosios eilės inverterio filtro induktyvumo  $L_F$  modelio perdavimo charakteristika, remiantis šaltiniu (Lar *et al.* 2012), yra tokia:

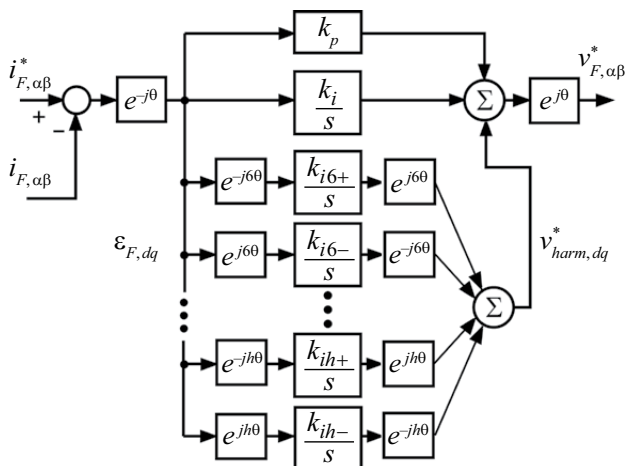
$$v_{F,\alpha\beta}^*(k) = 4v_{\alpha\beta}(k-1) - 2v_{\alpha\beta}(k-2) - v_{F,\alpha\beta}^*(k-1) + \frac{L_F}{T_s} [3i_{F,\alpha\beta}^*(k-1) - 2i_{F,\alpha\beta}^*(k-2) - i_{F,\alpha\beta}(k-1)], \quad (1)$$

čia  $k$  – diskretizavimo imties numeris;  $T_s$  – diskretizavimo periodas. Kiti kintamieji, kurie pateikti stacionarioje atskaitos sistemoje ( $\alpha, \beta$ ), yra:  $v_{F,\alpha\beta}^*$  – inverterio išėjimo atstojamosios įtampos;  $v_{\alpha\beta}$  – PCC taško įtampos;  $i_{F,\alpha\beta}^*$  – inverterio filtro atstojamosios srovės;  $i_{F,\alpha\beta}$  – inverterio filtro srovės. Pagrindinis šio valdiklio trūkumas yra jautrumas sistemos parametų sklaidai. Šiame valdiklyje papildomai

būtina įvertinti faktą, kad inverteris yra netiesinis dėl jo tranzistorinių raktų atidarymo vėlinimo (angl. *Dead-time*) efekto.

### PI-SRF-MRI valdiklis

Selektyvaus harmonikų kompensavimo algoritme yra naudojama keletas integratorių, kurių kiekvienas funkcionuoja savo sinchroniškai besisukančioje atskaitos sistemoje dažniuose  $\pm h\omega_1$  ( $h = 6k, k = 1, 2, \dots$ ) (Lascu *et al.* 2009) (2 pav.). Šis integratorių masyvas kaip įėjimo signalą naudoja srovės klaidą  $\varepsilon_{F,dq}$ , kuri apskaičiuota sinchroniškai besisukančioje ( $d, q$ ) atskaitos sistemoje (sinchronizuota su PCC įtampos vektoriumi). Šis srovės klaidos signalas taip pat yra įėjimo signalas PI valdikliui, kuris valdo nuolatinės įtampos (DC) kondensatoriaus pakrovimo būseną reaktyviajai energijai kompensuoti. Šis valdiklis yra imlus skaičiavimams, nes, norint kompensuoti kiekvieną harmoniką atskirai, reikia atlikti keletą atskaitos sistemų transformacijų. Dėl diskretizavimo dažnio vėlinimo PI-SRF-MRI valdiklis tampa nestabilus aukštesniosios harmonikoms. Todėl reikalinga papildoma kompensavimo kampo  $\theta_{ch}$  dedamoji atliekant atvirkštines atskaitos sistemų transformacijas pereinant nuo harmoninės atskaitos sistemos prie sinchroniškai besisukančios atskaitos sistemos (Lascu *et al.* 2009).



2 pav. Supaprastinta PI-SRF-MRI valdiklio blokinė schema  
Fig. 2. The basic block diagram of PI-SRF-MRI controller

### P-SSI valdiklis

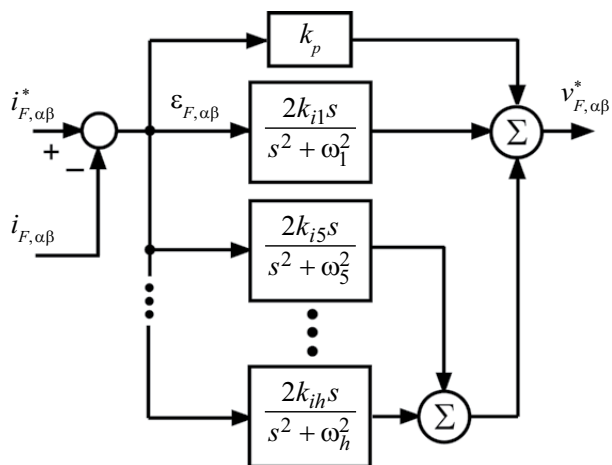
Norint atsisakyti keleto atskaitos sistemų, P-SSI valdiklyje (3 pav.) (Yuan *et al.* 2002) yra naudojami sinusoidinių signalų integratoriai (SSI), kurie garantuoja, jog srovė seks jos sinusoidinę atstojamąją komponentę su nuline nusistovėjusios veikos klaida ir bus suderinta konkrečiam dažniui  $\omega_{set}$ . Tolydaus laiko srityje P-SSI valdiklio perdavimo funkcija yra (Yuan *et al.* 2002) tokia:

$$H_{P-SSI} = k_p + \frac{2k_i s}{s^2 + \omega_0^2}, \quad (2)$$

čia  $k_p$  – proporcinis stiprinimo koeficientas;  $k_i$  – integrinis stiprinimo koeficientas;  $\omega_0$  – rezonansinis dažnis. SSI reguliatoriaus privalumai tokie:

- nulinė nusistovėjusios veikos klaida  $\omega_0$  dažniui;
- keletas SSI turi skirtingus rezonansinius dažnius, todėl gali veikti lygiagrečiai netrukdydami vienas kitam;
- SSI gali veikti tiek su pozityvios, tiek su neigtyvios eilės signalais, nes vienas SSI yra tapatus dviem paprastiesiems integratoriams, besisukantiems dažniais  $\pm\omega_0$ .

Inverteriui skirtas P-SSI valdiklis, naudojantis keletą SSI stacionarioje atskaitos sistemoje, yra suderintas ( $6k \pm 1$ ), ( $k = 1, 2, \dots$ ) eilės srovės harmonikoms (Yuan *et al.* 2002). Fundamentaliosios srovės harmonikai valdyti naudojamas vienas P-SSI reguliatorius yra suderintas 50 Hz srovės harmonikai. Pagrindinė jo funkcija yra valdyti aktyviąją srovę, siekiant išlaikyti nustatytą kondensatorių DC įtampą. Šiuo valdikliu taip pat galima kompensuoti nesubalansuotos apkrovos sąlygomis tekančias sroves.

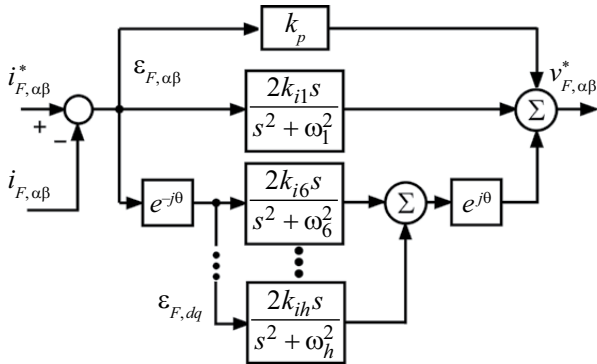


3 pav. Supaprastinta P-SSI valdiklio blokinė schema  
Fig. 3. The basic block diagram of P-SSI controller

### P-SSI-SRF valdiklis

Šis valdiklis yra patobulintas P-SSI valdiklis, tačiau harmonikų kompensavimas vykdomas sinchroniškai besisukančioje atskaitos sistemoje (4 pav.). Vienas reguliatorius fundamentaliajai srovei valdyti įgyvendintas stacionarioje atskaitos sistemoje. Kiti harmoninių srovių reguliatoriai įgyvendinti sinchroniškai besisukančioje atskaitos sistemoje, sinchronizuotoje su PCC įtampos vektoriumi, ir yra suderinti dažniams  $6k\omega_1$ , ( $k = 1, 2, \dots$ ) (Bojoi *et al.* 2005). Taip galima kompensuoti dvi srovės harmonikas panaudojant tik vieną reguliatorių. Taip pat šiuo metodu yra

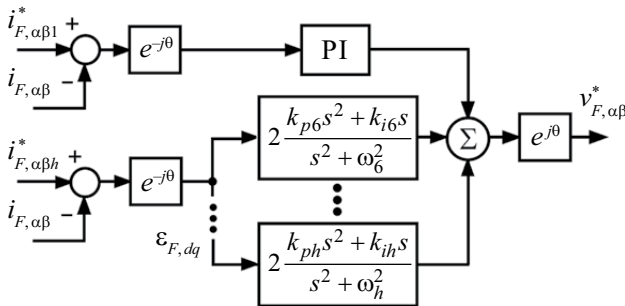
perpus sumažinamas reikalingas SSI skaičius lyginant su P-SSI valdikliu. PI-SSI-SRF valdiklio realizacija naudojant šešiolikos skilčių neslankiojo kablelio signalinį procesorių pateikta šaltinyje (Bojoi *et al.* 2005).



4 pav. Supaprastinta PI-SSI-SRF valdiklio blokinė schema  
Fig. 4. The basic block diagram of PI-SSI-SRF controller

### PI-SRF-RES valdiklis

Šis valdiklis (5 pav.) yra patobulinta P-SSI-SRF valdiklio versija. Čia taip pat naudojamas dviejų srovės harmonikų kompensavimas vienu reguliatoriumi (Lascu *et al.* 2007; Xu *et al.* 2010).



5 pav. PI-SRF-RES valdiklio supaprastinta struktūra  
Fig. 5. The basic block diagram of PI-SRF-RES controller

PI-SRF-RES valdiklyje naudojami rezonansiniai reguliatoriai, kurie yra tapatūs dviem kompleksiniams PI reguliatoriams, besisukantiems dažniais  $\pm\omega_0$ . Tolydaus laiko srityje rezonansinio reguliatoriaus perdavimo funkcija yra:

$$H_{\text{PI-RES}} = 2 \frac{k_p s^2 + k_i s}{s^2 + \omega_0^2}, \quad (3)$$

čia  $k_p$  – proporcinis stiprinimo koeficientas;  $k_i$  – integrinis stiprinimo koeficientas;  $\omega_0$  – rezonansinis dažnis. Šiame valdiklyje yra dvi atstojamosios srovės  $i_{F,\alpha\beta}^*$  komponentės:  $i_{F,\alpha\beta 1}^*$  – fundamentaliajai srovei valdyti;  $i_{F,\alpha\beta h}^*$  – harmoninėms srovėms valdyti. Harmoninėms srovėms valdyti kiekvieno rezonansinio valdiklio parametrai apskaičiuojami polių-nulių šalinimo metodu kiekvienam reikalingam

dažniui. Taigi kiekvienas rezonansinis valdiklis yra tapatus dviem PI reguliatoriams, besisukantiems  $\pm h\omega_1$  dažniu, su atskirtomis  $d$  ir  $q$  ašimis. Taip yra pagerinamas valdiklio stabilumas atsisakant vėlinimo kompensavimo metodų (Lascu *et al.* 2007).

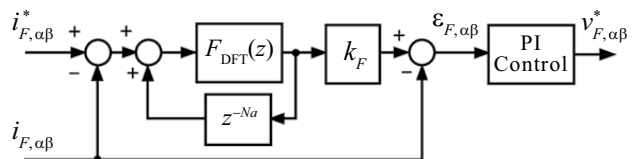
### Kartotinis valdiklis

Šis srovės valdymo metodas, turintis panašią dažninę charakteristiką kaip ir P-SSI valdiklis (Chen *et al.* 2013), paremtas diskrečiąja Furjė transformacija (DFT). DFT perdavimo funkcija, kuria galima įgyvendinti kartotinį valdymą atliekant 100 komutavimų 10 kHz diskretizavimo dažnyje, yra tokia:

$$F_{\text{DFT}}(z) = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \left[ \sum_{k \in N_h} \cos\left(\frac{\pi}{N} h(i + N_a)\right) \right] z^{-i}, \quad (4)$$

čia  $N$  – komutavimų skaičius;  $N_h$  – pasirinktų harmonikų skaičius;  $N_a$  – žingsnių skaičius, reikalingas sistemos stabilumui garantuoti (Chen *et al.* 2013).

Taikant (4) lygtį galima įgyvendinti visus SSI filtrus, pateiktus 3 pav., naudojant tik DFT su nustatyta  $N$  koeficiento verte. Į šį DFT filtrą galima žiūrėti kaip į ribotos impulsinės reakcijos filtrą. Supaprastinta šio valdiklio blokinė schema pateikta 6 pav. Klaidos signalas apskaičiuojamas iš  $i_{F,\alpha\beta}^*$  ir  $i_{F,\alpha\beta}$ ; o DFT yra aprašomas (4) lygtimi ir naudojamas pasirinktiems dažniams tiksliai sekti. Papildomai reikalingas  $N_a$  žingsnių vėlinimas siekiant išvengti nestabilumų, sukeltų aukštesniųjų harmonikų diskretizavimo. Parametras  $k_F$  nustato valdiklio pereinamąją charakteristiką. Kartotinio valdiklio išėjimo signalas tampa nuostatos signalu PI valdikliui.



6 pav. Supaprastinta kartotinio valdiklio blokinė schema  
Fig. 6. The basic block diagram of a Repetitive controller

### Aktyviųjų harmonikų kompensavimo algoritmų palyginimas

Visi apžvelgti AHK algoritmai buvo įvertinti atsižvelgiant į šiuos kriterijus: skaičiavimo intensyvumą, daviklių skaičius, atitiktį galios dalies topologijai, gebėjimą kompensuoti harmonikas, priklausomybę nuo apkrovos tipo. Analizė buvo atlikta remiantis mokslinėse publikacijose pateikiamais modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų rezultatais. Gauti rezultatai pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė. Skirtingų AHK algoritmų palyginimas

Table 2. Comparison of different AHC algorithms

| Parametras/metodas         | PI-SRF       | Dead-beat    | PI-SRF-MRI   | P-SSI        | P-SSI-SRF    | PI-SRF-RES   | Kartotinis   |
|----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Skaičiavimo intensyvumas   | Žemas        | Žemas        | Aukštas      | Aukštas      | Vidutinis    | Vidutinis    | Vidutinis    |
| Jutiklių kiekis            | Standartinis | Standartinis | Standartinis | Standartinis | Standartinis | Standartinis | Standartinis |
| Topologijos atitiktis      | Geras        | Geras        | Geras        | Geras        | Geras        | Geras        | Geras        |
| Harmonikų kompensavimas    | iki 13-os    | iki 13-os    | iki 19-os    | iki 19-os    | iki 19-os    | iki 37-os    | iki 19-os    |
| Priklausomybė nuo apkrovos | Žema         | Žema         | Žema         | Žema         | Aukšta       | Vidutinė     | Aukšta       |

Skaičiavimo intensyvumas vertintas atsižvelgiant į reikalingas realaus laiko operacijas, galimas tipiniame signaliniame procesoriuje.

Jutiklių kiekis vertintas atsižvelgiant į tipiniame SETI esamų išėjimo srovių, tinklo įtampų, nuolatinės įtampos matavimo jutiklių kieki.

Algoritmo ir topologijos sąsaja vertinta atsižvelgiant į tai, jog daugumoje SETI naudojamos pilnutinio tiltelio (angl. *Full-bridge*) topologijos galios dalys su IGBT (angl. *Insulated Gate Bipolar Transistors*) tranzistoriniais raktais.

Gebėjimas kompensuoti harmonikas buvo vertintas 10 kHz diskretizavimo dažniui. Didėjant diskretizavimo dažniui, aukštesnės eilės harmonikų kompensavimas gerėja, tačiau buvo pasirinktas 10 kHz diskretizavimo dažnis siekiant suvienodinti AHK algoritmų palyginimo rezultatus.

Analizuojant įvairių AHK algoritmų harmonikų kompensavimo kokybės priklausomybę nuo apkrovos tipo, buvo vertinta, kaip konkretus AHK algoritmas reaguoja į skirtingas apkrovas ir kaip kompensuoja harmonikas svyruojant elektros tinklo impedansui.

## Išvados

1. Išnagrinėta aukštesniųjų srovės harmonikų elektros tinkle problema.
2. Analizuojant pagrindinius tarptautinius ir atskirų valstybių standartus, reguliuojančius paskirstytųjų elektrinių prijungimą prie žemos įtampos elektros tinklų, matyti, kad šiomis elektrinėmis galima gerinti elektros tinklo kokybę, iš dalies kompensuojant aukštesnias srovės harmonikas.
3. Išanalizuoti septyni skirtingi aktyvieji harmonikų kompensavimo algoritmai, kurie tinka įgyvendinti saulės elektrinių tinklo inverteriuose.
4. Atsižvelgiant į tipinę saulės elektrinių tinklo inverterių struktūrą, sudaryta palyginamoji lentelė, naudotina renkantis algoritmus tolesniems tyrimams. Palyginimui parinkti penki parametrai (skaičiavimo intensyvumas, daviklių skaičius, topologijos atitiktis, harmonikų ko-

mpensavimas, kompensavimo priklausomybė nuo apkrovos), pagal kuriuos įvertinti nagrinėti algoritmai.

5. Algoritmas turėtų būti parinktas kiekvienam sprendžiamam uždaviniui individualiai, nes kiekvienas iš jų turi skirtingas savybes.

## Literatūra

- Bhattacharya, A.; Chakraborty, C.; Bhattacharya, S. 2012. Parallel-connected shunt hybrid active power filters operating at different switching frequencies for improved performance, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 59(11): 4007–4019. <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2011.2173893>
- Bojoi, R. I., et al. 2005. Current control strategy for power conditioners using sinusoidal signal integrators in synchronous reference frame, *IEEE Transactions on Power Electronics* 20(6): 1402–1412. <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2005.857558>
- Chen, D.; Zhang, J.; Qian, Z. 2013. An improved repetitive control scheme for grid-connected inverter with frequency-adaptive capability, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 60(2): 814–823. <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2012.2205364>
- Geibel, D., et al. 2009. Improvement of power quality and reliability with multifunctional PV-inverters in distributed energy systems, in *2009 10th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation IEEE*, 15–17 September, 2009, Lodz, 1–6.
- IEC 2004. *IEC 61727: Photovoltaic (PV) Systems – Characteristics of the Utility Interface*, Geneva, 2004.
- IEC 2011. *IEC 61000-3-12 Electromagnetic Compatibility (EMC) –Part 3–12: Limits –Limits for Harmonic Currents Produced by Equipment Connected to Public Low-voltage Systems with Input Current >16 A and ≤ 75 A Per Phase*, Geneva, 2011 [online], [cited 31 May 2013]. Available from Internet: <http://www.iec-normen.de/217949/iec-61000-3-12-2011-05-ed-2-0-zweisprachig.html>
- IEEE 2003. *1547-2003 IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems*, New York, 2003 [online], [cited 31 May 2013]. Available from Internet: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8676>
- Yuan, X., et al. 2002. Stationary-frame generalized integrators for current control of active power filters with zero steady-state error for current harmonics of concern under unbalanced

- and distorted operating conditions, *IEEE Transactions on Industry Applications* 38(2): 523–532.  
<http://dx.doi.org/10.1109/28.993175>
- Lar, I., *et al.* 2012. Current control methods for grid-side three-phase PWM voltage-source inverter in distributed generation systems, in *2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) IEEE*, 24–26 May, 2012, Brasov, 859–867.
- Lascu, C., *et al.* 2007. High performance current controller for selective harmonic compensation in active power filters, *IEEE Transactions on Power Electronics* 22(5): 1826–1835.  
<http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2007.904060>
- Lascu, C., *et al.* 2009. Frequency response analysis of current controllers for selective harmonic compensation in active power filters, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 56(2): 337–347. <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2008.2006953>
- Mayr, C.; Brundlinger, R.; Bletterie, B. 2007. Photovoltaic-inverters as active filters to improve power quality in the grid. What can state-of-the-art equipment achieve?, in *2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation IEEE*, 9–11 October, 2007, Barcelona, 1–5.
- VDE 2010a. *DIN EN 61000-3-2 VDE 0838-2:2010-03 Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 3-2: Limits – Limits for Harmonic Current Emissions (equipment Input Current = 16 A Per Phase)*, Berlin, 2010 [online], [cited 31 May 2013]. Available from Internet: <http://www.vde-verlag.de/standards/0838021/din-en-61000-3-2-vde-0838-2-2010-03.html>
- VDE 2010b. *VDE-AR-N 4105 Generators Connected to the Low-voltage Distribution Network – Technical Requirements for the Connection to and Parallel Operation with Low-voltage Distribution Networks*, Berlin, 2010 [online], [cited 31 May 2013]. Available from Internet: <http://www.vde.com/en/fnn/pages/n4105.aspx>
- Xu, L., *et al.* 2010. Selective compensation strategies for the 3-phase cascaded multilevel active power filter using ANF-based sequence decoupling scheme, *Electronics and Electrical Engineering* 2(98): 15–20.

## ANALYSIS OF ACTIVE HARMONIC COMPENSATION ALGORITHMS FOR GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC INVERTERS

A. Platakis

Abstract

A review of various standards, concerning distributed generation, and different Active Harmonic Compensation (AHC) or Active Power Filtering (APF) methods are presented in this paper. Short overview of each control method is given. The experimentation results from various publications are taken into account evaluating the feasibility of an AHC algorithm to be integrated in a typical commercially available grid-connected Photovoltaic inverter. The comparison results are presented in a table. The results of this paper can be used for further investigation in deciding which particular algorithm to try to implement and experiment with.

**Keywords:** electric current control, photovoltaic systems, power harmonic filters, pulse width modulation inverters.