

Systemy testowe dla potrzeb analizy harmonicznych w układach zasilających zawierających energetyczne filtry aktywne²⁾ (artykuł dyskusyjny)

Test systems for the needs of harmonics analysis in supply systems containing power active filters (debate article)

Analiza zjawisk zachodzących w systemach zasilających, w których występują wyższe harmoniczne w przebiegach prądów i napięć, jest ważną częścią zagadnień związanych z jakością energii elektrycznej [18]. Są one odpowiedzialne nie tylko za odkształcenia przebiegów prądów i napięć zasilających, ale również mogą być przyczyną przeciążeń i odkształceń, a także awarii [1,2,13]. Mogą powodować:

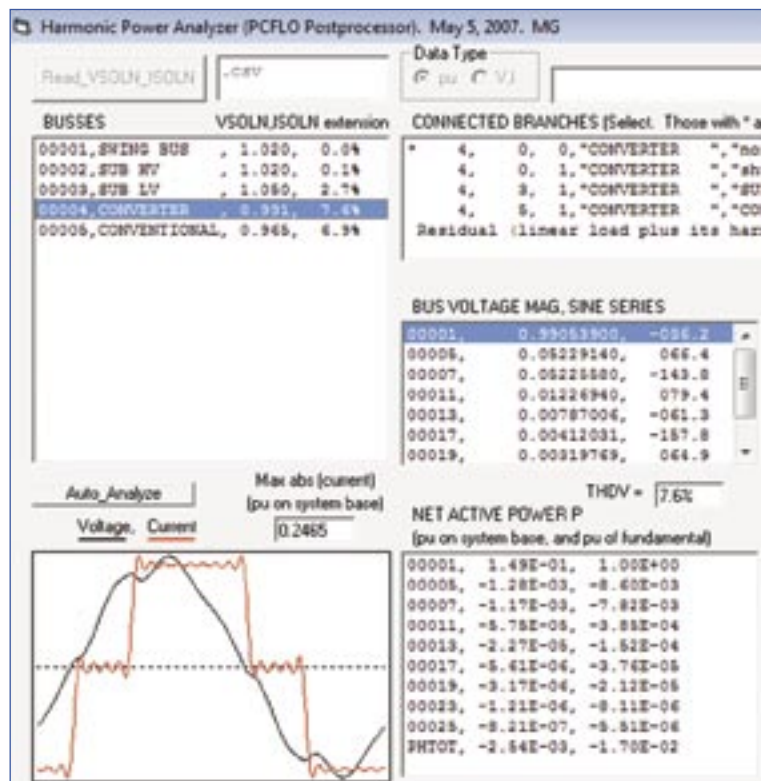
- przeciążenia sieci spowodowane wzrostem wartości skutecznej prądu, a tym samym wzrostem strat w elementach rezystancyjnych; ten parametr szczególnie powiązany jest z impulsowym charakterem przebiegu prądu; prąd taki występuje np. w układach z powszechnie stosowanymi zasilaczami impulsowymi (zasilacze komputerów, ładowarki telefonów komórkowych itp.), a także energooszczędnymi świetłówkami kompaktowymi; pomimo niewielkiej wartości średniej może charakteryzować się znaczną wartością skuteczną, co jest przyczyną zwiększenia się strat energii oraz przegrzewania się elementów rezystancyjnych; straty te mogą być nawet kilkanaście razy większe od strat w układzie z przebiegami sinusoidalnymi;
- przeciążenia przewodów neutralnych w układach trójfazowych spowodowane sumowaniem się harmonicznych rzędu trzeciego wywołanych przez odbiorniki jednofazowe; wyższe harmoniczne występujące w układach trójfazowych mogą być analizowane za pomocą pojęć z zakresu składowych symetrycznych; podobnie w wyższych harmonicznych rzędów wyższych możemy wyróżnić składową zgodną (harmoniczne o rzędzie 1,4,7 itd.), składową przeciwną (2,5,8 itd.)

oraz składową zerową (3,6,9 itd.); harmoniczne odpowiadające składowej zerowej mają take samo przesunięcie fazowe w każdej z faz układu, w wyniku czego następuje ich sumowanie, co może doprowadzić do sytuacji, w której wartość skuteczna prądu przewodu neutralnego jest wielokrotnie większa od wartości skutecznych prądów fazowych; duża część instalacji nie została zaprojektowana do tego rodzaju obciążenia (przekroje przewodów neutralnych są zgodne, a czasami nawet mniejsze od przekroju przewodu fazowego); w skrajnym przypadku może dojść nawet do uszkodzenia przewodu neutralnego, a tym samym odłączenia wszystkich odbiorników jednofazowych od sieci zasilającej;

- przeciążenia, wibracje oraz przedwczesne starzenie się generatorów, transformatorów, silników, a także baterii kondensatorów przeznaczonych do korekcji współczynnika mocy;
- odkształcenia napięcia zasilającego, powodujące zakłócenia w pracy wrażliwych odbiorników; szczególnie podatne na tego rodzaju zakłócenia są elementy sieci teleinformatycznych; w wyniku obecności wyższych harmonicznych urządzenia te mają tendencje do tzw. zawieszania, wskutek czego sieć nie może świadczyć usług transmisji danych; wymagania niezawodności stawiane operatorom telekomunikacyjnym powodują, że bardzo często wykorzystują oni dodatkowe układy (najczęściej UPFC - ang. Unified Power Flow Controller) zapewniające właściwą jakość napięcia zasilania;
- przedwczesne starzenie się izolacji (wyższe harmoniczne mogą być przyczyną przegrzewania oraz powstawania mikropęknięć w strukturze izolacji);
- groźne awarie będące następstwem występowania zjawisk rezonansowych i ferorezonansowych wywołanych wyższymi harmonicznymi; pasożytnicze zjawiska rezonansowe mogą być przyczyną przepływu dużych prądów przez sieć zasilającą oraz mogą powodować indukowanie się napięć znacznie wyższych niż napięcie sieci zasilającej.

¹⁾ e-mail: marcin.maciazek@polsl.pl, michal.lewandowski@polsl.pl, marian.pasko@polsl.pl

²⁾ Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010-2013 jako projekt badawczy nr N N510 257338



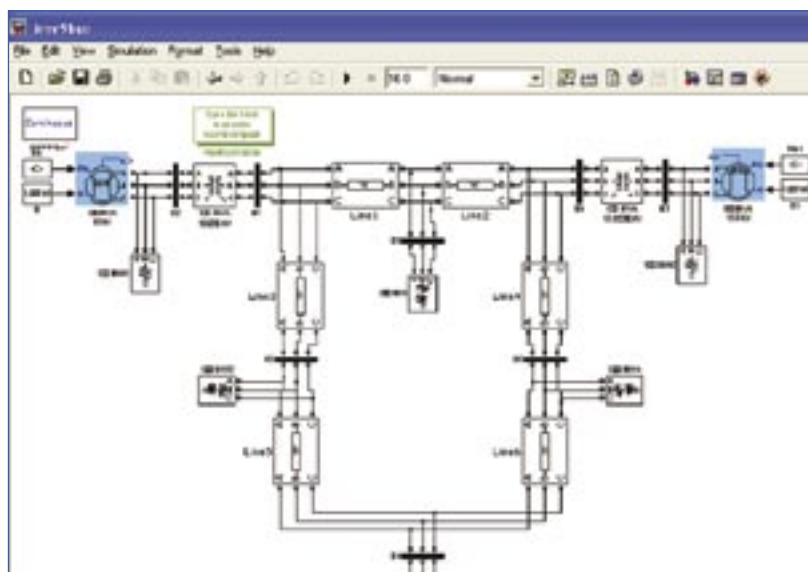
Rys. 1. Przykładowe okno programu PCFLO [8] z wynikiem analizy częstotliwościowej oraz przebiegami prądu i napięcia w wybranym węźle analizowanego systemu

Dostępnych jest wiele metod umożliwiających przeprowadzenie analizy układów zasilających zawierających odbiorniki nieliniowe, które są przyczyną występowania harmonicznych. Opracowano również szereg oprogramowania umożliwiającego przeprowadzenie takiej analizy. Dostępne jest komercyjne oprogramowanie dedykowane, np. ETAP [7] czy też oprogramowanie darmowe, np. PCFLO [8] (rys.1).

Do celu analizy harmonicznych można również wykorzystać symulatory ogólnego przeznaczenia, np. Matlab/Simulink [11], pozwala to nie tylko na przeprowadzenie analizy systemu, ale

poprzez obecność dużej liczby toolboxów również na wykonanie dodatkowych algorytmów, np. optymalizację systemu według zadanego kryterium (autorzy zamierzają wykorzystać te możliwości do optymalizacji rozmieszczenia energetycznych filtrów aktywnych w systemie). Przykładowo na rysunku 2 pokazano fragment 9-węzłowego systemu testowego IEEE zaimplementowanego przez autorów artykułu w środowisku Matlab/Simulink.

Porównanie wyników analizy otrzymanych z tych programów, które mogą wykorzystywać różne algorytmy obliczeniowe, wymaga wykorzystania uniwersalnego systemu testowego.



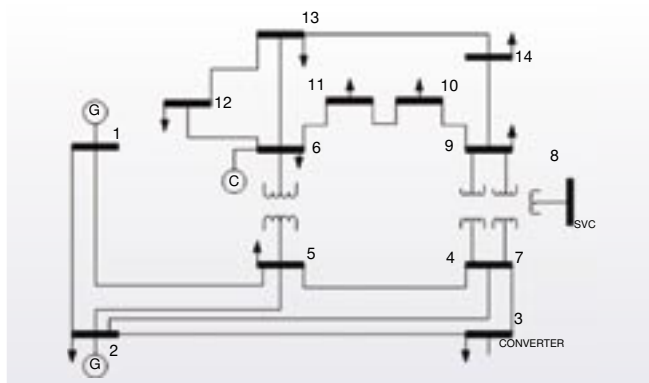
Rys. 2. Fragment schematu blokowego systemu IEEE 9 opracowanego w środowisku Matlab/Simulink (opracowanie autorskie)

Systemy testowe

W Polsce brakuje propozycji układów, które mogłyby zostać wykorzystane do tego celu, natomiast w rozwiązaniach światowych grupa IEEE - „Task Force on Harmonics Modeling and Simulation” [16,17] przygotowała do tego celu propozycję trzech systemów.

1. System 14-węzłowy.

Schemat tego układu pokazany został na rysunku 3 [16].



Rys. 3. Testowy system 14-węzłowy [16]

Jest to układ zbalansowany zawierający dwa źródła wyższych harmonicznych (odbiorniki nieliniowe) 12-pulsowy HVDC (ang. High - Voltage Direct Current) w węźle 3 oraz SVC (ang. Static VAR Compensator) w węźle 8. Parametry węzłów wraz z wyznaczonym THD [13] zestawione zostały w tabeli 1.

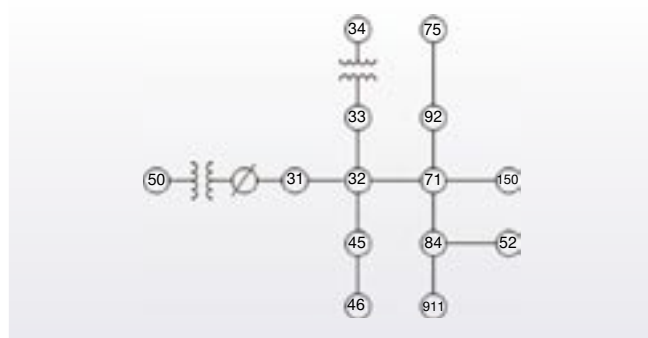
Tabela 1

Wyniki analizy systemu z rysunku 3 [16]

Bus	Nominal voltage (kV)	P Load (KW)	Q Load (KVar)	LF Voltage (pu)	LF Angle (deg)	THD (%)
1	230	0	0	1,0600	0,00	1,767
2	230	0	0	1,0450	-5,68	2,177
3	230	0	0	1,0427	-15,30	1,516
301	35,4	59 505	3 363	1,0417	-16,18	9,169
302	35,4	59 505	3 363	1,0417	-16,18	9,169
4	230	47 790	-3 900	1,0282	-11,41	0,755
5	230	7 599	1 599	1,0337	-9,82	1,462
6	230	0	0	1,0700	-15,87	0,468
7	230	0	0	1,0193	-14,47	0,423
8	13,8	0	12 900	1,0209	-14,49	0,522
9	115	29 499	16 599	1,0147	-16,09	0,482
10	115	9 000	5 799	1,0168	-16,33	0,421
11	115	3 501	1 800	1,0394	-16,21	0,394
12	115	6 099	1 599	1,0528	-16,72	0,391
13	115	13 500	5 799	1,0458	-16,73	0,376
14	115	14 901	5 001	1,0154	-17,39	0,343

2. System 13-węzłowy I.

Schemat układu pokazany został na rysunku 4 [16].

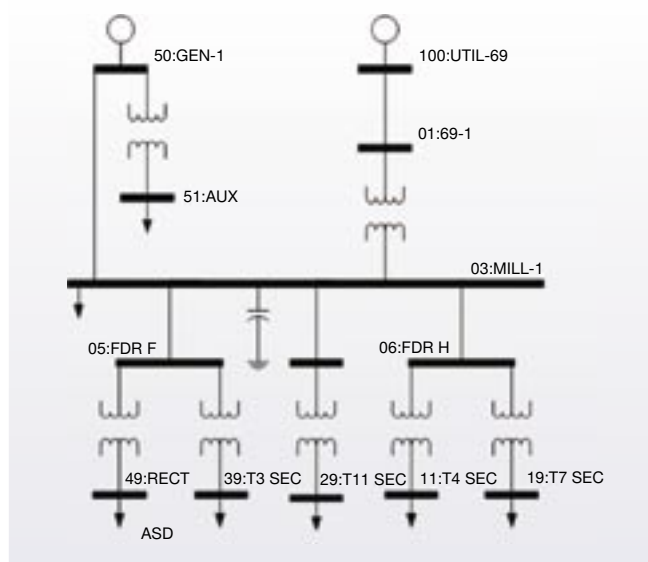


Rys. 4. Testowy niezbalansowany system 13-węzłowy [16]

W systemie wykorzystano 13-węzłowy system testowy IEEE opracowany dla potrzeb analizy rozptyłu mocy w systemie elektroenergetycznym. Zawiera on regulatory napięcia, linie trój- oraz jednofazowe, baterie kondensatorów oraz grupę odbiorników (fazowych oraz międzyfazowych). Pełne dane systemu można znaleźć w załączniku do publikacji [16].

3. System 13-węzłowy II.

Schemat układu pokazany został na rysunku 5 [16].



Rys. 5. Testowy zbalansowany system 13-węzłowy [16]

Przedstawiony na rysunku 5 system odwzorowuje średnich rozmiarów sieć przemysłową. Parametry węzłów sieci zestawione zostały w tabeli 2.

Dodatkowo dostępnych jest wiele modeli sieci [9] opracowanych przez IEEE dla potrzeb analizy rozptyłu mocy w systemach elektroenergetycznych, np. IEEE 30-węzłowy, IEEE 57-węzłowy, a nawet 300-węzłowy. Jednak systemy te zawierają parametry jedynie dla podstawowej harmonicznej. Stąd ich wykorzystanie do analizy rozptyłu harmonicznych wymagałoby dodatkowego wstępnego ich przeliczenia.

Tabela 2

Wyniki analizy systemu z rysunku 5 [16]

Bus	V_{mag} (p.u.)	δ (deg)	P_{gen} kW	Q_{gen} kvar	P_{load} kW	Q_{load} kvar	THD _v (%)
100:UTIL-69	1	0	7450	540	-	-	0,28
01:69-1	1	-0,13	-	-	-	-	0,37
03:MILL-1	0,99	-2,4	-	-	2240	2000	1,93
50:GEN1	1	-2,39	2000	1910	-	-	1,87
51:Aux	1	-3,53	-	-	600	530	1,81
05:FDR F	0,99	-2,4	-	-	-	-	1,94
49:RECT	0,98	-4,72	-	-	1150	290	8,02
39:T3 SEC	1	-4,85	-	-	1310	1130	1,8
26:FDR G	0,99	-2,4	-	-	-	-	1,93
06:FDR H	0,99	-2,4	-	-	-	-	1,93
11:T4 SEC	0,98	-3,08	-	-	370	330	1,9
19: T7 SEC	1	-4,69	-	-	2800	2500	1,81
29:T11 SEC	0,98	-4,16	-	-	810	800	1,84

Modelowanie odbiorników nieliniowych

Najczęściej wykorzystywanym modelem odbiornika nieliniowego jest źródło prądowe z zadanym widem amplitudowo-fazowym wyższych harmonicznych. Parametry widma mogą zostać wyliczone z uproszczonych teoretycznych modeli matematycznych lub bezpośrednio z wyników pomiarów. W większości przypadków widmo wyznaczone z wyników pomiarów dostarcza modeli lepiej odwzorowujących rzeczywistość. W przypadku gdy system będzie zawierał wiele takich modeli ważne jest właściwe odwzorowanie widma fazowego. W niektórych przypadkach do opracowania modelu należy wykorzystać parametry zmienne w czasie, przykład takiego modelowania można znaleźć w publikacji [4].

Metody analizy systemów elektroenergetycznych

Złożoność systemu elektroenergetycznego wymaga stosowania różnego rodzaju uproszczeń zarówno w obszarze identyfikacji parametrów, jak i w obszarze analizy, z których najważniejsze dotyczy pominięcia wszystkich nieliniowości, które mogą w nim wystąpić. Do analizy takich systemów możemy wykorzystać jedną z poniżej wymienionych metod.

- Metodę analizy sinusoidalnego stanu ustalonego, w której system traktowany jest jako układ LTI (liniowy o parametrach niezmiennych w czasie). Wszystkie przebiegi występujące w takim systemie traktowane są jako przebiegi sinusoidalne reprezentowane przez wartości skuteczne oraz przesunięcia fazowe. Natomiast odbiorniki opisywane są impedancjami dla częstotliwości podstawowej.
- Metodę częstotliwościową, która wykorzystuje rozkład przebiegów prądów i napięć w szereg Fouriera. Dla każdej z tak wyznaczonych składowych szeregu Fouriera wyznacza się zależności pomiędzy prądem i napięciem oraz impedancje poszczególnych elementów systemu. W ten sposób

otrzymuje się charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe oraz fazowo-częstotliwościowe systemu. Ten rodzaj analizy w dalszym ciągu możliwy jest do zrealizowania przy założeniu, że analizowane sygnały są okresowe. Metoda ta jest do dzisiaj najczęściej wykorzystywaną metodą analizy systemu w stanie quasi-ustalonym [3, 10].

- Metodę czasowo-częstotliwościową umożliwiającą analizę układów o czasowo-zmiennych parametrach lub zmiennej konfiguracji. Jednym z możliwych podejść jest wykorzystanie do tego celu analizy falkowej [5]. Wyniki otrzymane w wyniku takiej analizy czasami mogą trafić na problemy interpretacyjne, przykładem może być brak definicji impedancji, gdyż wykorzystane funkcje bazowe są pasmem częstotliwości, stąd stosunek reprezentacji falkowych prądów i napięć nie może zostać wykorzystany do jej definicji. Jednocześnie rozwiązania otrzymywane w przedziale czasu są łatwe do porównywania, stąd mogą dostarczać wiele cennych informacji. Metoda ta wymaga znacznie większej mocy obliczeniowej niż metoda częstotliwościowa.
- Metodę czasową, którą wykorzystuje się do analizy stanów nieustalonych (np. rozruchów). Złożoność opisu oraz zapotrzebowanie na ogromną moc obliczeniową ogranicza zastosowanie tej metody jedynie do małych fragmentów systemu oraz krótkich czasów analizy.

Energetyczne filtry aktywne

Energetyczny filtr aktywny [12] kompensuje chwilowe odchyłki wartości przebiegów prądu/napięcia od przebiegu sinusoidalnego (uważanego w energetyce za optymalny). W przypadku ogólnym układ EFA jest energoelektronicznym źródłem prądu/napięcia dodatkowego, przyłączonym równolegle/szeregowo do odbiornika. Suma prądu/napięcia filtra i prądu/napięcia linii zasilającej w idealnym przypadku powoduje, że prąd/napięcie źródła jest sinusoidalny(-e), a warunki pracy odbiornika nie ulegają zmianie. Wszystkie niepożądane składowe prądu bądź napięcia zamykają się w układzie odbiornik-EFA, nie obciążając tym samym źródła zasilania.

Można wyróżnić kilka podstawowych kryteriów umożliwiających sklasyfikowanie układów EFA. Jednym z nich jest kryterium dotyczące sieci zasilającej, w której układy te miałyby pracować. W takim przypadku EFA możemy podzielić na:

- jednofazowe,
- trójfazowe trójprzewodowe (najczęściej występujący przypadek),
- trójfazowe czteroprzewodowe (umożliwiające dodatkowo kompensację prądu w przewodzie neutralnym).

Drugi sposób podziału wynika ze sposobu włączenia EFA do układu źródło-odbiornik (pochodną tego są jego właściwości filtracyjne). Przy takim kryterium możemy te układy podzielić na:

- równoległe, w których EFA jest źródłem prądu dodatkowego; do budowy najczęściej wykorzystuje się energoelektroniczne falowniki napięcia (VSI) z cewkami do nadążnego kształtowania prądu; w układzie tym elementem umożliwiającym gromadzenie energii najczęściej jest kondensator;
- szeregowo, w których EFA włączany jest szeregowo do układu źródło-odbiornik i służy do eliminacji chwilowych odchyłek napięcia; napięcie kompensujące wprowadzane

jest do układu poprzez transformator; podczas projektowania należy uwzględnić, że przez jedno z uzwojeń przepływać będzie prąd odbiornika, który może osiągać duże wartości;

- szeregowo-równoległe (tzw. układy UPFC), które łączą właściwości układu równoległego oraz szeregowego; ważna w tym układzie jest kolejność włączenia poszczególnych sekcji; w układzie tym EFA pozwala na eliminację harmonicznych zarówno z przebiegu prądu jak i napięcia zasilania;
- hybrydowe, będące połączeniem filtra pasywnego z EFA; filtr pasywny może być połączony z EFA szeregowo bądź równoległe; napięcie występujące na zaciskach kluczy energoelektronicznych (tranzystorów IGBT) jest znacznie niższe niż w układach tradycyjnych, mniejsze są też wartości prądów; pozwala to na zmniejszenie kosztów konstrukcyjnych oraz budowę filtrów o większej mocy pozornej; połączenie cech filtra pasywnego i aktywnego przekłada się na dobre właściwości filtracyjne przy znacznej redukcji wad w stosunku do filtracji pasywnej (filtru rezonansowego).

Analizy harmonicznych w systemach zawierających energetyczne filtry aktywne

Dostępne modele systemów testowych nie zawsze można wykorzystać do analizy systemów, do których mogą zostać podłączone energetyczne filtry aktywne (np. w celu poprawy wskaźników jakościowych energii elektrycznej). W szczególności jeżeli chcemy analizować układy z narzuconymi ograniczeniami, np. technologicznymi. Współczesne energetyczne filtry aktywne budowane są maksymalnie dla poziomu napięć średnich, dlatego np. analizowanie systemu 14-węzłowego, w którym większość węzłów ma napięcie > 100 kV wydaje się być bezcelowe.

Znacznie lepszym (po wstępnej analizie) jest system 13-węzłowy (zbalansowany) średniego napięcia. Jednak w tym systemie współczynnik THD [13] jedynie w jednym węźle wykracza poza dopuszczalny poziom określony w normach, np. [14].

Również większość systemów opracowanych dla potrzeb analizy rozpyły mocy nie nadaje się do tego celu, gdyż zazwyczaj są to systemy WN. Brak uregulowań normatywnych powoduje, że autorzy analizujący tego typu układy albo nie narzucają ograniczeń technologicznych [15], albo opracowują własne [19] propozycje systemów umożliwiające porównanie warunków pracy systemu przed i po włączeniu energetycznych filtrów aktywnych.

Podsumowanie

Przegląd literatury, z którego wnioski przedstawione zostały w niniejszym artykule, miał na celu przygotowanie założeń dla systemu testowego umożliwiającego opracowanie metod optymalizujących rozmieszczenie energetycznych filtrów aktywnych w modelu sieci zasilającej. Założone ograniczenia nie pozwalają na skorzystanie wprost z opracowanych dotychczas modeli systemów testowych. Przegląd literatury krajowej nie wykazał opracowań systemów testowych dla potrzeb krajowego systemu elektroenergetycznego, dlatego autorzy zdecydowali się na wykorzystanie przykładowych systemów dostępnych w literaturze [6] oraz systemów opracowanych na podstawie dokumentacji istniejących fragmentów krajowej sieci zasilającej.

Gdyby Czytelnikom artykułu nasunęły się wnioski mogące pomóc w rozwiązaniu kwestii doboru systemu testowego zawierającego energetyczne filtry aktywne, autorzy będą bardzo wdzięczni za wszelkie sugestie oraz opinie. Dane kontaktowe autorów podano w przypisie.

LITERATURA

- [1] Baranecki A., Niewiadomski M., Płatek T.: Odbiorniki nieliniowe – problemy i zagrożenia. *Wiadomości Elektrotechniczne* 2004, nr 3, s. 24-26
- [2] Beniak R., Gardecki A., Hickiewicz J., Moch J., Wach P.: Jakość energii elektrycznej – normalizacja, pomiary, przykłady. *Wiadomości Elektrotechniczne* 2003, nr 4, s. 131-135
- [3] Bień A., Buchała G., Morończyk A.: THD factor measurement with using watch filtration of the fundamental frequency. 5-th International Conference Electrical Power Quality and Utilisation. Cracow September 1999, s. 217-221
- [4] Capasso A., Lamedica R., Prudenzi A., Ribeiro P.F., Ranade S.J.: Probabilistic assessment of harmonic distortion caused by residential load areas, Proc. ICHPS IV, Bologna, Italy
- [5] Duda K.: Analiza zakłóceń w sieci energetycznej z zastosowaniem dyskretnej zespolonej transformaty falkowej wyznaczanej w podwójnym drzewie falkowym. *Pomiary, Automatyka, Kontrola* 2006, s. 119-123
- [6] Grady M.: „Understanding Power System Harmonics” http://users.ece.utexas.edu/~grady/Harmonics_Notes_Grady_June_2006_print.pdf
- [7] <http://etap.com/harmonic-analysis/harmonic-analysis.htm>
- [8] <http://users.ece.utexas.edu/~grady/PCFLO.html>
- [9] <http://www.ee.washington.edu/research/psca/>
- [10] Kuśmirek Z.: Harmoniczne w systemach elektroenergetycznych, *Przegląd Elektrotechniczny* 2006, R.82, nr 6, s. 8-19
- [11] MathWorks - MATLAB and Simulink for Technical Computing <http://www.mathworks.com>
- [12] Pasko M., Maciążek M., Buła D.: Metody poprawy jakości energii elektrycznej - kształtowanie prądu źródła, *Wiadomości Elektrotechniczne* 2007, R.75, nr 8, s. 17-25
- [13] Pasko M., Maciążek M., Buła D.: Wprowadzenie do zagadnień analizy jakości energii elektrycznej, *Wiadomości Elektrotechniczne* 2007, R.75, nr 4, s. 4-9
- [14] PN-EN 50160:2002/Ap1:2005 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych
- [15] Shaheen H.I., Rashed G.I., Cheng S.J.: Optimal location and parameters setting of unified power flow controller based on evolutionary optimization techniques, *Power Engineering Society General Meeting, Tampa 2007*, s. 1-8
- [16] Task Force on Harmonics Modeling and Simulation „Test Systems for Harmonics Modeling and Simulation”, *IEEE Trans. On Power Delivery*, 14, 1999, s. 579-585
- [17] Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, „The modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks Part II : Sample systems and Examples”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.11, No.1, January 1996, s. 466-474
- [18] Watson N.R., Arrillaga J.: Harmonics in large systems, *Electric Power Systems Research* 66 (2003), s.15-29
- [19] Yamamoto F., Kitamura A., Fujita N., Nakanishi Y., Nagasawa M.: A study on optimal locations and sizes of active filters as an additional function of distributed generation systems, *Systems, Man, and Cybernetics*, 1999. IEEE SMC '99 Conference Proceedings. Vol. 6, s.515-520