

Filtry aktywne – skuteczna metoda redukcji składowych wyższych harmonicznych prądu

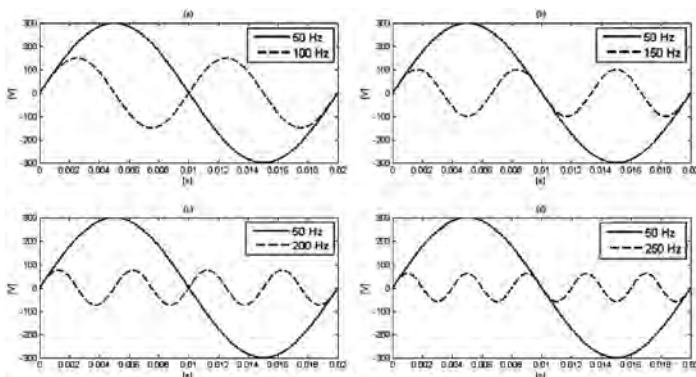
Damian Chojnacki, Jakub Polichnowski

Wysokie tempo rozwoju techniki w ostatnich stuleciach miało znaczący wpływ na poprawę standardu życia ludzi zamieszkujących kraje rozwijające się. Jedną z konsekwencji tego zjawiska jest ciągły wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną. Szacuje się, że w ciągu najbliższych 20 lat popyt na ten rodzaj energii zwiększy się o ok. 20% w skali całego świata [1]. Wzrost bieżącego zużycia energii elektrycznej wymusza jednocześnie zwiększenie stopnia jej produkcji, która w znacznym stopniu opiera się na zasobach naturalnych takich jak: węgiel kamienny, ropa naftowa czy gaz ziemny. Surowce te należą do nieodnawialnych źródeł energii. Z tego powodu bardzo ważne jest oszczędzanie energii elektrycznej.

Istnieje wiele urządzeń elektrycznych wyposażonych w obwody energoelektroniczne, których wykorzystanie pozwala na zaoszczędzenie dużej ilości energii. Najczęściej są to urządzenia o nieliniowych charakterystykach wejściowych. Pobierają one zniekształcony prąd, przez co wprowadzają do sieci elektrycznej zakłócenia w postaci składowych wyższych harmonicznych. Ze względu na intensywny wzrost poziomu produkcji i stosowania tego typu urządzeń w ostatnich latach problem wyższych harmonicznych prądu stał się zdecydowanie poważniejszy [2].

Następstwa obecności wyższych harmonicznych prądu w sieci elektrycznej

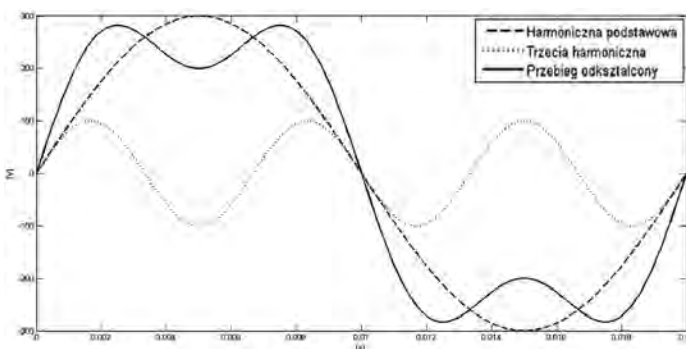
Termin harmoniczna pochodzi od określania tym pojęciem wibracji struny lub kolumny powietrza w akustyce. W elektrotechnice pojęcie to dotyczy składowej przebiegu (np. sinusoidalnego) o częstotliwości, która jest całkowitą krotnością danej częstotliwości podstawowej [3]. Na rys. 1 przedstawiono przebieg sinusoidalny o częstotliwości podstawowej 50 Hz wraz z jego harmonicznymi.



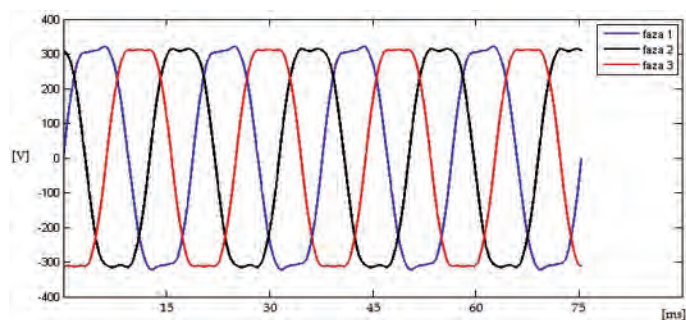
Rys. 1. Przebieg sinusoidalny o częstotliwości podstawowej 50 Hz wraz z jego harmonicznymi: a) 2. – 100 Hz, b) 3. – 150 Hz, c) 4. – 200 Hz, d) 5. – 250 Hz

Inż. Damian Chojnacki, mgr inż. Jakub Polichnowski – Zakład Energoelektroniki „WRZOSEL” s.j., Toruń

W rzeczywistości nie występuje sygnał o kształcie idealnej sinusoidy, tzn. taki, który byłby złożony tylko ze składowej podstawowej. Rzeczywisty przebieg sinusoidalny jest sumą jego składowych harmonicznych. Rys. 2 przedstawia przykładowy odkształcony przebieg wraz z jego harmonicznymi. Napięcie występujące w sieci elektrycznej nie jest idealnie sinusoidalne. Jego kształt zależy m.in. od liczby zasilanych przez nią odbiorników nieliniowych. Na rys. 3 przedstawiony został przykładowy kształt rzeczywistego napięcia.



Rys. 2. Przykładowy przebieg odkształcony wraz z jego harmonicznymi



Rys. 3. Przykładowy przebieg napięcia w sieci elektrycznej

W celu określenia zawartości harmonicznych prądu w sygnale odkształconym stosuje się współczynnik $THDi$ (total harmonic current distortion). Jest on zdefiniowany jako stosunek wartości skutecznej wyższych harmonicznych sygnału, do wartości skutecznej wartości podstawowej. Zazwyczaj podawany jest w procentach [2]. Dla sygnału sinusoidalnego współczynnik ten wynosi

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_1}$$

gdzie:

n – liczba harmonicznych,

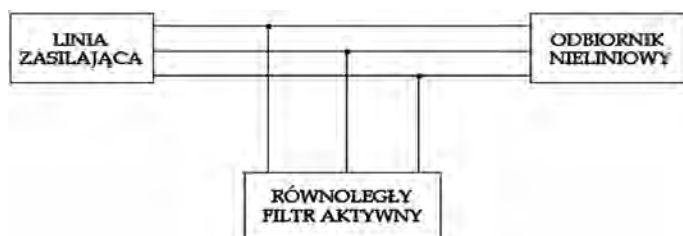
I_1 – wartość skuteczna prądu 1. harmonicznej,

I_h – wartość skuteczna prądu h -tej harmonicznej.

Podczas badania właściwości prądu płynącego w sieci elektrycznej bazuje się na harmonicznym do 50. rzędu, co oznacza częstotliwość 2,5 kHz dla częstotliwości podstawowej 50 Hz [4]. Składowe wyższych harmonicznym prądu w sieciach elektrycznych są efektem ubocznym działania nieliniowych odbiorników takich jak: żarówki energooszczędne, regulatory oświetlenia czy przetwornice częstotliwości [4]. Odształcony prąd, którego są źródłem powoduje zniekształcenia fali napięcia zasilającego. Występowanie składowych wyższych harmonicznym w sieci elektrycznej ma negatywny wpływ na prawidłową pracę urządzeń, które są z niej zasilane. Obecność zniekształceń powoduje wzrost strat mocy oraz wzrost zużycia energii pobieranej przez urządzenia, a co za tym idzie szybsze zużywanie się komponentów, z których zbudowany jest system. Redukcja sprawności oraz wzrost strat ciepłych w urządzeniach niosą za sobą poważne konsekwencje dla całego systemu. Zwiększenie temperatury o 10°C w odniesieniu do temperatury znamionowej może spowodować skrócenie żywotności izolacji nawet do 50%. Według badań ekspertów obecność składowych wyższych harmonicznym powoduje wzrost temperatury od 2 do 5°C w zależności od ich rzędu oraz amplitudy. W ekstremalnych przypadkach zakłócenia występujące w sieci zasilającej powodują niestabilną pracę urządzeń sterujących, ich samoczynne wyłączanie, pulsację wałów silników oraz trwałe uszkodzenia komponentów [1]. Zgodnie z prawem Kirchhoffa składowe harmoniczne rozprzestrzeniają się po całej instalacji. Jedną z metod eliminacji zjawiska rozprzestrzeniania się zakłóceń w sieci zasilającej jest zastosowanie filtracji aktywnej.

Filtry aktywne – budowa i zasada działania

Filtry aktywne służą do redukcji składowych wyższych harmonicznym w sieci elektrycznej. Działają na zasadzie generacji tych harmonicznym, które są pobierane przez odbiorniki nieliniowe. Jeśli odbiornik pobiera 5. oraz 7. harmoniczną, to zostają one wytworzone przez filtr aktywny. Wyróżnia się dwa rodzaje filtrów aktywnych – równoległe oraz szeregowo [6]. Filtry równoległe służą do eliminacji zakłóceń prądowych. Są podłączane równoległe do linii zasilającej. Nieustannie generują te harmoniczne, które są pobierane przez nieliniowe odbiorniki zasilane z sieci, dzięki czemu kształt fali prądu pozostaje sinusoidalny. Na rys. 4 przedstawiono sposób podłączenia równoległego filtra aktywnego do sieci [5]. Budowa równoległych filtrów aktywnych opiera się na dwóch głównych elementach – procesorze oraz generatorze. Za pomocą procesora analizowany jest prąd obciążenia. Na podstawie tej informacji generator wytwarza takie harmoniczne prądowe, jakie są pobierane od strony zasilania. Pomiar odbywa się za pomocą przekładnika prądowego, dzięki czemu filtr szybko reaguje na zmiany harmonicznym obciążenia [5]. Główną zaletą filtrów równoległych jest fakt, iż nie można ich przeciążyć [6].



Rys. 4. Sposób podłączenia równoległego filtra aktywnego do sieci



Rys. 5. Sposób podłączenia szeregowego filtra aktywnego do sieci

W przypadku filtrów szeregowych korygowane są nie tylko harmoniczne prądowe pobierane przez nieliniowe odbiorniki, ale także już obecne w sieci odształcenia napięcia. Filtry te podłączane są do sieci szeregowo. Na rys. 5 przedstawiono sposób podłączenia filtra szeregowego do linii zasilania [5]. Podstawowym elementem szeregowego filtra aktywnego jest wyspecjalizowany układ energoelektroniczny. Filtr wytwarza napięcie o fazie przeciwnej do składowej harmonicznym, co powoduje jej kompensację.

Główne zalety stosowania filtrów aktywnych to: znaczne zmniejszenie współczynnika *THDi* sieci zasilającej, poprawa współczynnika mocy i zmniejszenie strat na komponentach systemu. Urządzenia te cechują się dużą elastycznością. Możliwe jest także ich zaprogramowanie, które pozwala na reakcję tylko na określone harmoniczne [6].

Nowoczesne filtry aktywne typu AAF

Filtr aktywny AAF firmy Danfoss służy do eliminacji składowych harmonicznym pochodzących z odbiorników nieliniowych, dzięki czemu poprawia współczynnik mocy całego systemu zasilania. Może on być stosowany do kompensacji zarówno pojedynczych napędów jak i całych grup odbiorników nieliniowych. Filtry tego typu mogą zostać bardzo łatwo zainstalowane w już istniejących instalacjach, które wymagają kompensacji wyższych harmonicznym. Ze względu na budowę modułową, urządzenia te są niezawodne i wydajne energetycznie, a w przypadku usterki naprawa ogranicza się do modułu bądź zespołu modułów – zamiast całego urządzenia. Istnieje także możliwość łatwego programowania i konfiguracji tych urządzeń za pomocą panelu LCP [4].

Większość filtrów aktywnych służących do tłumienia harmonicznym jest projektowana do prac w trybie kompensacji selektywnej lub kompensacji szerokopasmowej. Filtry aktywne AAF pozwalają na wybór trybu pracy w zależności od zastosowania [1].

W trybie kompensacji selektywnej wykorzystywana jest operacja szybkiej transformaty Fouriera – FFT (*fast fourier transform*). Zostaje ona użyta w celu obliczenia amplitudy oraz kąta fazowego odpowiednich składowych harmonicznym. Zaletą tej metody jest wysoka precyzja obliczeń, dzięki czemu możliwa jest kompensacja składowych harmonicznym do określonych wartości. Właściwość ta powoduje, iż jest to idealne rozwiązanie w przypadku sieci o częstotliwości rezonansowej, która zawiera się w przedziale pracy filtra aktywnego. Wadą przedstawionej metody jest duża złożoność numeryczna co prowadzi do wydłużenia czasu obliczeń. W przypadku, gdyby filtr nie był w stanie przeprowadzić pełnej kompensacji, istnieje możliwość wyboru kompensacji indywidualnej w dowolnej chwili [1].

W trybie kompensacji szerokopasmowej usunięta zostaje częstotliwość podstawowa występująca w widmie sygnału prądowego, a dodawany jest sygnał, który ma przeciwną fazę do pozostałych częstotliwości. Takie rozwiązanie pozwala na kompensację składowych harmonicznym, interharmonicznym oraz harmonicznym o wielokrotności trzech, co znacznie poprawia skuteczność działania, kiedy sieci mają charakter niesymetryczny i/albo zniekształcony.

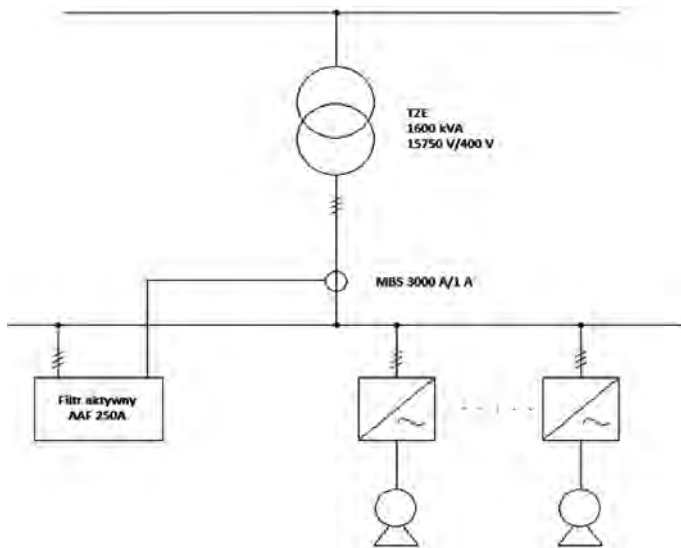
Podstawowe dane techniczne dotyczące filtru aktywnego równoległego firmy Danfoss [1]

Typ filtru	3P/3W, filtr aktywny równoległy
Częstotliwość	od 50 do 60 Hz ($\pm 5\%$)
Obudowy	IP 21- NEMA 1, IP 54 – NEMA 12
Maksymalne zniekształcenie sieci [%]	10 20 (przy ograniczonym działaniu)
Temperatura [°C]	0–40 (średnia 24): +5 przy ograniczonym działaniu, -10 przy ograniczonym działaniu
Wysokość [m]	1000 bez obniżania wartości znamionowych, 3000 przy ograniczonym działaniu (5%/1000)
EMC	standard IEC 55011 klasa A2, kategoria C3 z IEC61800-3, opcjonalnie IEC 55011 klasa A1, kategoria C2 z IEC 61800-3
Pokrycie obwodów elektronicznych	enkapsulacja – IEC 60721-3-3, klasa 3C3
Języki	18 różnych
Tryby kompensacji harmonicznyc	selektywna (90% RMS do redukcji harmonicznyc), szerokopasmowa (100% RMS do redukcji harmonicznyc)
Spektrum kompensowanych harmonicznyc	od 2. do 40. w trybie kompensacji szerokopasmowej, w trybie kompensacji selektywnej 5., 7., 11., 13., 17., 19., 23., 25., harmoniczne wielokrotności trzech
Alokacja poszczególnych harmonicznyc prądu w trybie kompensacji selektywnej	I5: 63%, I7: 45%, I11: 29%, I13: 25%, I17: 18%, I19: 16%, I23: 14%, I25: 13%
Kompensacja prądu biernego	tak, do wartości docelowej
Redukcja migotania	tak, w trybie kompensacji szerokopasmowej
Priorytet kompensacji	możliwość wyboru trybu z priorytetem kompensacji harmonicznyc lub mocy biernej
Praca równoległa	do 4 jednostek tej samej mocy w trybie master-follower
Przekładniki prądowe	1A i 5A po stronie wtórnej z opcją autostrojenia, klasa 1 lub wyższa
Wejścia/Wyjścia cyfrowe	4 (2 programowalne), logika PNP albo NPN
Interfejs komunikacyjny	RS485, USB1.1
Rodzaj regulacji	bezpośrednia regulacja harmonicznyc (w celu szybszej reakcji)
Czas odpowiedzi	< 0,5 ms
Czas ustalania przy kompensacji harmonicznyc	< 15 ms
Czas ustalania przy kompensacji mocy biernej	< 20 ms
Maksymalne przetężenie	5%
Częstotliwość kluczowania	progresywna regulacja w zakresie 1–18 kHz
Średnia częstotliwość przełączania	3–4,5 kHz

Tryb ten różni się od kompensacji selektywnej tym, że nie są tu znane osobne składowe harmoniczne, co sprawia, iż nie istnieje możliwość wykorzystania kompensacji indywidualnej [1].

Powszechnie stosowanym i preferowanym algorytmem regulacji filtrów aktywnych jest modulacja szerokości impulsów – PWM (*pulse width modulation*). Ze względu na nagłe zmiany obciążenia, występowanie rezonansów i stanów niestabilnych parametry pracy sieci elektrycznej zmieniają się w sposób ciągły. Przez działanie w tak zmiennych warunkach dynamika modulatora PWM jest często zbyt mała, aby mógł on zapewnić optymalne działanie urządzenia i korzystną filtrację w tak zmiennych warunkach [1].

W filtrze aktywnym AAF firmy Danfoss modulacja szerokości impulsów została pominięta, przez co impulsy służące do sterowania przełącznikami IGBT są dostarczane bezpośrednio z regulatora prądu. Takie rozwiązanie pozwala na osiągnięcie czasu reakcji poniżej 30 μs [1]. Nowatorski algorytm sterowania umożliwia nie tylko poprawę kompensacji składowych wyższych harmonicznyc, ale także zapewnia ich lepsze tłumienie. Oznacza to, iż filtr aktywny AAF jest na tyle szybki, aby móc zredukować zakłócenia typu migotanie, pracując w trybie kompensacji szerokopasmowej [1]. W przeciwieństwie do wielu filtrów aktywnych, które mają stałą częstotliwość kluczowania, filtr aktywny AAF wykorzystuje progresywny model kluczowania. Takie rozwiązanie pozwala na wykorzystanie zmiennej częstotliwości kluczowania w zależności od charakterystyki tłumionych harmonicznyc. W przypadku harmonicznyc niskiego rzędu o dużych wartościach prądu -stosowana jest mała częstotliwość kluczowania, natomiast w celu tłumienia składowych harmonicznyc wysokiego rzędu o niewielkich amplitudach – stosowana częstotliwość jest dużo większa. Progresywny model kluczowania znacznie ogranicza obciążenia modułów IGBT, co powoduje mniejsze straty w układach elektroniki oraz wydłużenie żywotności urządzenia. Zmniejsza to także prawdopodobieństwo powstawania rezonansów w sieci elektrycznej i przewodach silnikowych [1]. Dane techniczne dotyczące filtru aktywnego równoległego firmy Danfoss przedstawiono w tabeli.



Rys. 6. Sposób instalacji filtra AAF 250A w pracującej rozdzielni

Testowanie filtra aktywnego typu AAF 250A w Krajowej Spółce Cukrowej Oddział Cukrownia Kruszwica

Skuteczność działania filtra aktywnego typu AAF 250A produkowanego przez firmę Danfoss została przetestowana w rozdzielni surowni w Cukrowni Kruszwica w województwie kujawsko-pomorskim. Zastosowanie filtra miało na celu sprawdzenie efektywności ograniczania dodatkowych strat obciążeniowych w transformatorze Tr1 powodowanych przez występowanie składowych wyższych harmonicznych prądu obciążenia. Straty te wywoływały znaczny przyrost temperatury transformatora, co było przyczyną ograniczenia prądu obciążenia transformatora do wartości, które znacząco odbiegały od wartości znamionowych. Filtr AAF 250A został zainstalowany w układzie przedstawionym na rys. 6.

Przekładniki prądowe (MBS 3000/1, 10 VA) służyły do pomiaru całkowitego prądu pobieranego z transformatora TZE 1600/15 po stronie 400 V, dlatego też zastosowany filtr kompensował wyższe harmoniczne generowane przez wszystkie nieliniowe odbiorniki zasilane z transformatora. Pomiary zrealizowano za pomocą analizatora sieci FLUKE 435, podłączonego bezpośrednio do szyn kompensowanego transformatora. Przekładniki prądowe analizatora mierzyły ten sam sumaryczny prąd transformatora, co ww. przekładniki prądowe filtra AAF 250A. Przed załączeniem filtra transformator został obciążony prądem o wartości skutecznej ok. 1700 A oraz sumaryczną mocą pozorną rzędu 1159 kVA. Wszystkie fazy były obciążone prawie symetrycznie. Widoczna była jedynie niewielka asymetria w prądach obciążenia: $L_1 = 1722 \text{ A}$, $L_2 = 1697 \text{ A}$, $L_3 = 1727 \text{ A}$.

Widmo prądu zawierało wyższe harmoniczne charakterystyczne dla przetwornic częstotliwości z prostownikami 6-pulsowymi, tj. harmoniczne 5., 7., 11., 13., 17., 19. Współczynnik odkształcenia prądu $THDi$ wyniósł ok. 12,8%. Pod względem amplitudy dominowały harmoniczne 5., 7., 11., których zawartości w odniesieniu do harmonicznej podstawowej wynosiły odpowiednio: $I_{5th} = 11,7\%$, $I_{7th} = 4,1\%$, $I_{11th} = 2,7\%$. Współczynnik odkształcenia napięcia $THDu$ wyniósł ok. 6%. W widmie częstotliwościowym napięcia dominowały również harmoniczne charakterystyczne dla przetwornic częstotliwości z prostownikami 6-pulsowymi.

Załączenie filtra aktywnego AAF 250A nie zmieniło obciążenia transformatora mocą pozorną ani nie zmieniło rozplywu prądów w poszczególnych fazach. Poprawiło natomiast znacząco kształt prądu w każdej z faz, gdyż zostały ograniczone wartości skuteczne wyższych harmonicznych. Po załączeniu filtra aktywnego widmo prądu nadal zawierało ww. wyższe harmoniczne, jednak ich wartości skuteczne były dużo mniejsze. Współczynnik $THDi$ zmalał do poziomu ok. 6,5%. Wartości skuteczne dominujących harmonicznych wynosiły odpowiednio: $I_{5th} = 5,3\%$, $I_{7th} = 3\%$, $I_{11th} = 1,8\%$. Wraz z obniżeniem poziomu wyższych harmonicznych prądu obniżył się także poziom napięcia każdej z harmonicznych (obliczony jako iloczyn wartości skutecznej prądu określonego rzędu harmonicznych oraz wartości impedancji zwarcia transformatora dla harmonicznej odpowiedniego rzędu), a tym samym współczynnik $THDu$ zawartości wyższych harmonicznych napięcia. Zmalał on do wartości ok. 4%.

Zakończenie

Składowe wyższych harmonicznych prądu są generowane przez nieliniowe odbiorniki podłączone do sieci elektrycznej. Obecność tych składowych ma negatywny wpływ na wszystkie urządzenia zasilane za pomocą tej sieci. Powodują one m.in. większe straty mocy, wzrost zużycia energii elektrycznej oraz szybsze starzenie urządzeń. Zastosowanie filtrów aktywnych jest dobrym sposobem kompensacji wpływu nieliniowych odbiorników na kształt napięcia zasilającego. Filtry te redukują zawartość składowych wyższych harmonicznych, zmniejszają współczynnik odkształcenia prądu $THDi$ oraz zmniejszają straty energii, dzięki czemu wzrasta sprawność i wytrzymałość techniczna urządzeń w sieci elektrycznej. W artykule omówiono instalację filtra aktywnego typu AAF 250A firmy Danfoss w Cukrowni Kruszwica w województwie Kujawsko-Pomorskim. Zastosowany filtr obniżył współczynnik $THDi$ z poziomu 12–13% do 6,5%. Dalsza redukcja wyższych harmonicznych prądu byłaby możliwa jedynie po zastosowaniu filtra o większej wydajności prądowej. Po zastosowaniu filtra aktywnego należy zatem rozważyć, czy obciążeniowe straty dodatkowe generowane przez wyższe harmoniczne osiągnęły akceptowalny poziom i czy dalsza kompensacja jest zasadna. Dodatkowo ograniczenie odkształcenia prądu spowodowało zmniejszenie strat obciążeniowych w kompensowanym transformatorze, proporcjonalnych do kwadratu prądu transformatora i do kwadratu częstotliwości. Poza tym ograniczenie odkształcenia napięcia z $THDu = 6\%$ do $THDu = 4\%$ wpłynęło pozytywnie na inne odbiorniki zasilane bezpośrednio z transformatora. Zmniejszenie zawartości wyższych harmonicznych napięcia miało pozytywny wpływ przede wszystkim na silniki zasilane bezpośrednio z tego transformatora.

LITERATURA

- [1] Broszura informacyjna firmy Danfoss. Zaawansowany Filtr Aktywny VLT® AAF Niezawodne urządzenie do tłumienia harmonicznych w Twojej instalacji.
- [2] Szulc Z.: Wpływ wyższych harmonicznych w napięciu zasilającym układy przemysłowe na jakość pracy odbiorników elektrycznych. *Elektro.info* 2003 nr 6
- [3] Hanzelka Z.: Jakość energii elektrycznej część 4 – Wyższe harmoniczne napięć i prądów. Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.
- [4] Broszura informacyjna firmy Danfoss. Metody ograniczania wpływu wyższych harmonicznych.
- [5] Klonowski M.: Jakość energii elektrycznej. http://www.klonu.pl/jakosc/32zmniej_zaw_harm.html
- [6] Karve S.: Jakość zasilania – poradnik. Harmoniczne. Filtry aktywne. Polskie Centrum Promocji Miedzi SA 2001