

Kamil KOŁODZIEJ¹

ANALIZA OGRANICZANIA WYŻSZYCH HARMONICZNYCH NIELINIOWYCH ODBIORNIKÓW PRZY WYKORZYSTANIU FILTRU AKTYWNEGO

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów związane z ograniczaniem wyższych harmonicznych nieliniowych odbiorników energii elektrycznej przy wykorzystaniu filtru aktywnego. Na wstępie artykuł omawia zagadnienia związane z problematyką filtracji wyższych harmonicznych przy wykorzystaniu filtrów pasywnych i aktywnych w sieciach 0,4 kV. W punkcie tym dokonano krótkie porównanie możliwych typów filtrów oraz ich charakterystycznych cech. Kolejno przedstawione zostały analityczne rozważania dotyczące filtracji wyższych harmonicznych w sieci trójfazowej, czteroprzewodowej przy wykorzystaniu filtru aktywnego, które mają na celu przedstawienie zasady generowania napięć przez filtr aktywny oraz ukazanie złożoności procesu filtracji wyższych harmonicznych. Przy tym przedstawiony i omówiony został schemat wydzielonej części instalacji przemysłowej, która poddana została analizie przy wykorzystaniu analizatorów sieci PM870 a także oscyloskopu cyfrowego z możliwością analizy FFT. W celu zbierania danych z analizatorów wykorzystany został zainstalowany na obiekcie system BMS, który pozwolił na zebranie dużej liczby wartości pomiarowych. Dzięki zebranym danym możliwe było określenie poziomów wartości asymetrii napięć oraz prądów, a także zawartości THD w przebiegach prądów przed oraz za filtrem wyższych harmonicznych. Pozwoliło to na ukazanie realnego oddziaływanie filtru. Poza tym dokonano analizy FFT, na podstawie której można zaobserwować oraz określić udział poszczególnych harmonicznych w tych przebiegach. Analiza ta pozwoliła również na określenie wpływu odzysku energii przy wykorzystaniu prądnic asynchronicznych z układami przekształtnikowymi na jakość energii elektrycznej. Dzięki uzyskanym wynikom pomiarów możliwe było określenie wpływu filtracji aktywnej na daną część sieci, a także udzielenie odpowiedzi na pytanie czy stosowanie tego typu filtracji jest potrzebne, a może wręcz niezbędne. Artykuł kończy się zebraniem wniosków z przeprowadzonej analizy oraz podsumowaniem.

Słowa kluczowe: wyższe harmoniczne, filtracja aktywna, jakość energii elektrycznej, FFT, BMS

¹ Autor do korespondencji: Kamil Kołodziej, Nienadówka 30, 36-050 Sokołów Małopolski, adres e-mail: kamil2222pl@wp.pl

1. Wprowadzenie

Od wieków obserwuje się ciągły rozwój nauki i techniki, co przekłada się na znaczący postęp w dziedzinach takich jak elektrotechnika czy elektronika. Rozwój ten niesie za sobą opracowywanie coraz to nowych urządzeń, które są implementowane w wielu obszarach przemysłu czy życia codziennego. Urządzenia te ze względu na swoją budowę wewnętrzną często są nieliniowymi odbiornikami energii elektrycznej. Oznacza to, że pobierają z linii elektroenergetycznej głównie niskich napięć prądy odkształcone o dużej zawartości harmonicznych. Odkształcenia prądów oraz ich asymetria powodują z kolei odkształcenia napięć zasilających oraz wzrost strat mocy w urządzeniach elektroenergetycznych. Wszystko to powoduje pogorszenie parametrów sieci elektroenergetycznej, czym stwarza realne zagrożenie nieprawidłową pracą a nawet uszkodzeniem urządzeń wrażliwych na zakłócenia.

Jednym ze sposobów ograniczenia tego efektu jest stosowanie przeznaczonych do tego celu filtrów wyższych harmonicznych. Filtry te mogą być budowane jako filtry pasywne, aktywne bądź hybrydowe. Filtry pasywne zbudowane są w oparciu o dławiki LC dobierane na tłumienie wybranych harmonicznych. Dzięki zjawisku rezonansu dla wybranej częstotliwości tłumionej harmonicznej impedancja obwodu jest bliska 0, co powoduje „wycinanie” danej harmonicznej z przebiegu prądu. Wadą tych filtrów jest natomiast brak możliwości samoczynnej regulacji zmieniającego się poziomu zniekształceń, co jest możliwe w przypadku filtrów aktywnych, oraz dodatkowe obciążenie podstawowej harmonicznej źródła zasilania. Poza tym występuje również ryzyko wystąpienia niepożądanego rezonansu pojemnościowych kompensatorów mocy biernej.

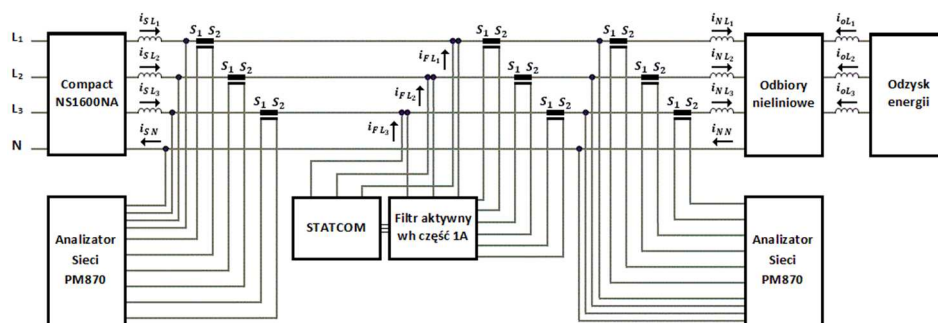
Tak więc oczywistym staje się, że stosowanie filtrów aktywnych bądź hybrydowych jest bardziej efektywnym rozwiązaniem w stosunku do filtrów pasywnych. Filtry te mogą być instalowane szeregowo (SAPF, ang. Serial Active Power Filter) lub równoległe (PAPF, ang. Parallel Active Power Filter) względem sieci zasilającej dany odbiornik nieliniowy lub ich zespół.

Filtry aktywne szeregowe stosowane są stosunkowo rzadko ze względu na fakt, że kompensacja prądów zasilających odbywa się przez odkształcenie napięć po stronie nieliniowego odbiornika. Dodatkowo połączenie to wymusza stosowanie dodatkowych zabezpieczeń przed prądami zwarciovymi sieci zasilającej, które zamykają się przez transformator filtru. Inaczej wygląda to w przypadku równoległych aktywnych filtrów wyższych harmonicznych. Dzięki zastosowaniu równoległego połączenia filtr zostaje uniezależniony od zmian obciążenia nieliniowych odbiorników oraz zmian struktury systemu energetycznego na danym obiekcie, dzięki czemu nie wpływa na strukturę sieci [1][2].

Przechodząc do zastosowań filtry aktywne równoległe znajdują szerokie zastosowanie wszędzie tam, gdzie pożądanym staje się ograniczenie wpływu wyższych harmoniczných odbiorników nieliniowych na sieć zasilającą. Szczególnie zastosowanie znajdują w obszarach przemysłowych czy centrach R&D, gdzie występują obszary oraz urządzenia, których współczynnik zawartości harmoniczných THD (ang. Total Harmonic Distortion) przekracza niejednokrotnie 100%.

2. Analityczne rozważania dotyczące filtracji wyższych harmoniczných przy wykorzystaniu filtru aktywnego

Aby można stwierdzić na jakim poziomie kształtuje się zawartość współczynnika THD w danej sieci elektrycznej oraz czy koniecznym staje się zastosowanie filtracji wyższych harmoniczných należy dokonać analizy sieci. Analiza ta pozwala na określenie występujących harmoniczných oraz ich wartości występujących w prądach nieliniowych odbiorników energii elektrycznej. Należy jednak zaznaczyć, że dla zakłóceń aperiodycznych tego typu analiza daje jedynie przybliżoną wiedzę na temat widma częstotliwościowego. Fakt ten sprawia, że po instalacji filtru wyższych harmoniczných koniecznym staje się wykonanie ponownej analizy. W celu określenia efektywności oraz zasadności instalacji filtru aktywnego wyższych harmoniczných przeprowadzono badania na terenie Centrum Technicznego BorgWarner Poland Sp.z.o.o. z siedzibą w Jasionce 950. Badania zostały wykonane na części instalacji elektrycznej jak na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat instalacji elektrycznej z aktywną filtracją wyższych harmoniczných oraz statyczną kompensacją w zakładzie przemysłowym BorgWarner Poland Sp.z.o.o.

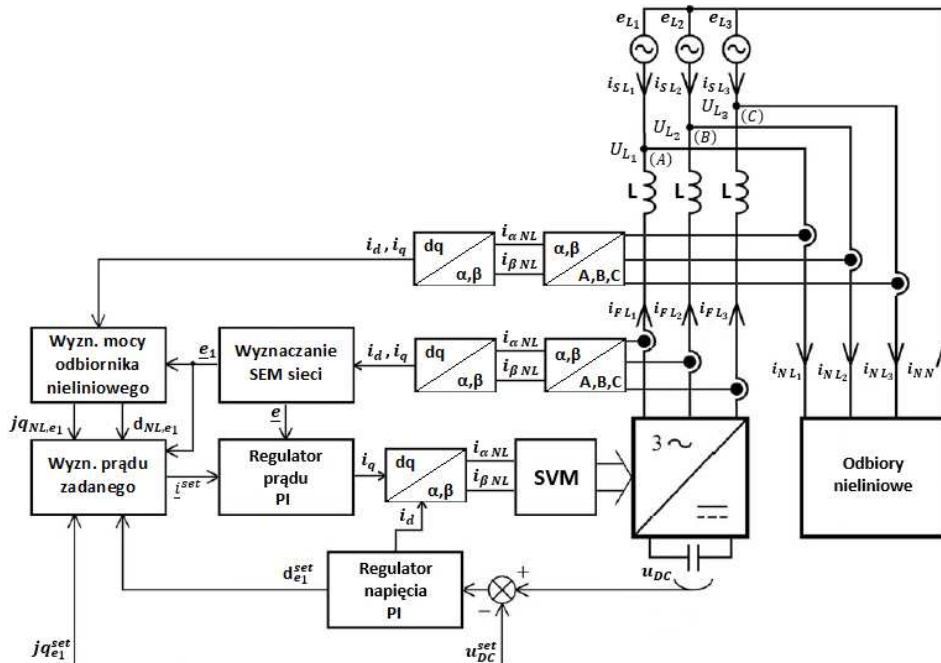
Fig. 1. Diagram of electrical installation with active filtration of higher harmonics and static compensation in the BorgWarner Poland industrial plant

Badaniu poddano sieć elektryczną przed filtrem (od strony sieci) oraz po filtrze (od strony odbiorników nieliniowych) typu AccuSine PCS120Y4IP20U

produkcji Schneider Electric. Filtr ten składa się z części A, w której występuje energetyczny filtr aktywny oraz części B STATCOM-a (Static Compensator). Układy połączone są ze sobą magistralą komunikacyjną oraz wpięte równolegle w jednym punkcie do sieci elektrycznej jak to pokazano na rysunku 1.

Z uwagi na znaczną ilość zagadnień związane z omówieniem EFA oraz STATCOM-u w artykule zostanie omówiona jedynie część związana z EFA. W kolejnym artykule przewiduje się omówienie części B związanej ze stabilizacją napięcia poprzez wykrywanie i kompensację wahań napięcia, a także kontrolowanie współczynnika mocy.

Aby zatem lepiej zrozumieć budowę oraz zasadę działania EFA na rysunku 2 przedstawiono przykładowy schemat blokowy tego typu filtru.



Rys. 2. Schemat blokowy układu sterowania równoległego filtru aktywnego, na podstawie [3]

Fig. 2. Block diagram of the active filter parallel control system, based on [3]

Jak można zaobserwować układ składa się z kilku kluczowych bloków. Na wstępie dokonywane jest wyznaczenie wektorów napięć e_{L1} , e_{L2} , e_{L3} w nieruchomym układzie współrzędnych naturalnych A,B,C. Następnie wielkości te z trójfazowego układu współrzędnych przekształcane są na dwufazowy układ współrzędnych ortogonalnych α oraz β . Współrzędne te można przekształcić na współrzędne α , $j\beta$ oraz 0 za pomocą transformacji Clarka

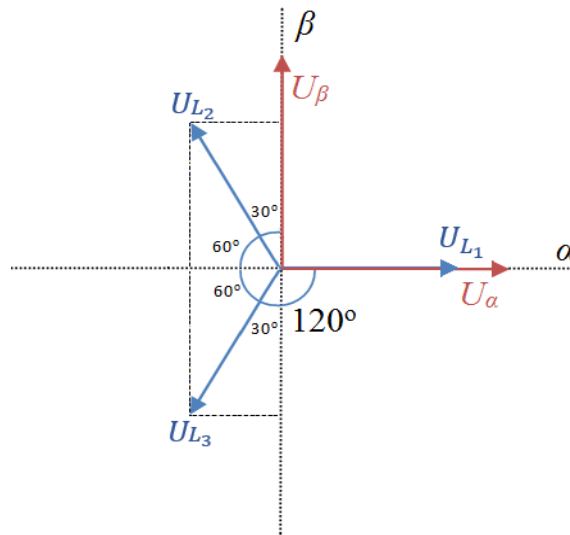
oznaczonej przez $T_{\alpha,\beta,0}$ przyjmując kierunek wirowania przeciwny do ruchu wskazówek zegara z zależności:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{e}_\alpha \\ \mathbf{e}_\beta \\ \mathbf{e}_0 \end{bmatrix} = T_{\alpha,\beta,0} * \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{L_1} \\ \mathbf{e}_{L_2} \\ \mathbf{e}_{L_3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie

$$T_{\alpha,\beta,0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Co wynika z zależności geometrycznych przedstawionych na rysunku 2.

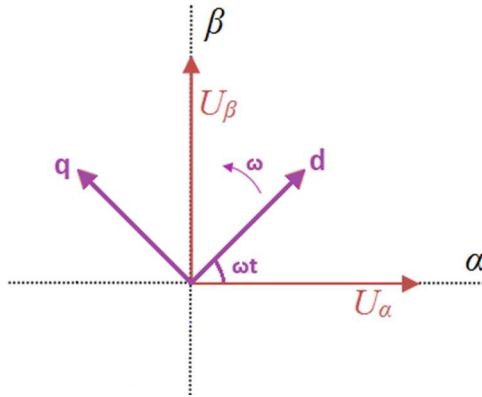


Rys. 3 Wektory napięć fazowych w układzie współrzędnych nieruchomych α, β

Fig. 3 Vectors of phase voltages in the immovable coordinate system α, β

Następnie stosowane jest przekształcenie Parka polegające na sprowadzeniu współrzędnych fazowych $U_{L_1}, U_{L_2}, U_{L_3}$ z rysunku 3 do układu współrzędnych $(d, q, 0)$, wirujących z prędkością ω (kąt między osią d oraz α wynosi ωt), tak aby współrzędne były nieruchome względem siebie, co pokazano

na rysunku 4 [3]. Tak więc przy przeniesieniu z jednego układu do drugiego zmianie ulega kąt wektorów.



Rys. 4. Układ współrzędnych d, q w układzie współrzędnych nieruchomych α, β

Fig. 4. Coordinate system d, q in the immovable coordinate system α, β

Tak więc współrzędne α, β mogą zostać sprowadzone do współrzędnych d, q za pomocą równania:

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \\ e_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) & 0 \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \\ U_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) & 0 \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * T_{\alpha,\beta,0} * \begin{bmatrix} e_{L1} \\ e_{L2} \\ e_{L3} \end{bmatrix} \quad (3)$$

lub

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \\ e_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t - \frac{4}{3}\pi) \\ \sin(\omega t) & \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\omega t - \frac{4}{3}\pi) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{L1} \\ e_{L2} \\ e_{L3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Co wynika z zależności geometrycznych przedstawionych na rysunku 4.

Przy wyznaczaniu napięć $U_f = [U_{L1}; U_{L2}; U_{L3}]$ generowanych przez falownik w celu ograniczenia harmonicznych prądów odbiorników nieliniowych można skorzystać z zależności:

$$U_f = K * I_{Sh} + D * I_{Nh} \quad (5)$$

gdzie: I_{Sh}, I_{Nh} - odpowiednio wyższe harmoniczne prądów sieci oraz nieliniowych odbiorników;
 K, D - współczynniki impedancyjne.

Aby wyznaczyć współczynniki K, D należy w pierwszej kolejności wyznaczyć wyższe harmoniczne prądów I_{Sh} oraz I_{Nh} . Przy obliczeniach dodatkowo zakłada się, że wyższe harmoniczne napięć sieciowych są równe 0 co oznacza idealne źródło napięciowe. Z twierdzenia o napięciu międzywęzłowym (Millmana) dla węzłów (A), (B), (C) łączących w sobie gałęzi sieci zasilającej, nieliniowych odbiorników oraz falownika filtru aktywnego można napisać wzór na wyższe harmoniczne napięcia tych węzłów

$$U_{A,B,C} = [U_{L_1}; U_{L_2}; U_{L_3}]:$$

$$U_{A,B,C} = \frac{U_f * \frac{1}{Z_F} - I_{Nh}}{\frac{1}{Z_s} + \frac{1}{Z_F}} = -Z_s * I_{Sh} \quad (6)$$

gdzie: U_f - napięcia generowane przez falownik;

I_{Sh}, I_{Nh} - odpowiednio wyższe harmoniczne prądów sieci oraz nieliniowych odbiorników;

Z_s, Z_F - odpowiednio impedancje sieci zasilającej oraz filtru aktywnego [4].

Wzór 6 pozwala na wyznaczenie napięć generowanych przez falownik filtru aktywnego. Aby go jednak zastosować konieczne są dalsze obliczenia analityczne, które z uwagi na ich objętość oraz objaśnienia im towarzyszące pominięto w dalszej części artykułu. Bazą do ich opracowania jest rozdział 5.23 pt. Energetyczne filtry hybrydowe z pozycji literaturowej nr.3.

3. Analiza oraz ograniczenie THD w sieci przemysłowej

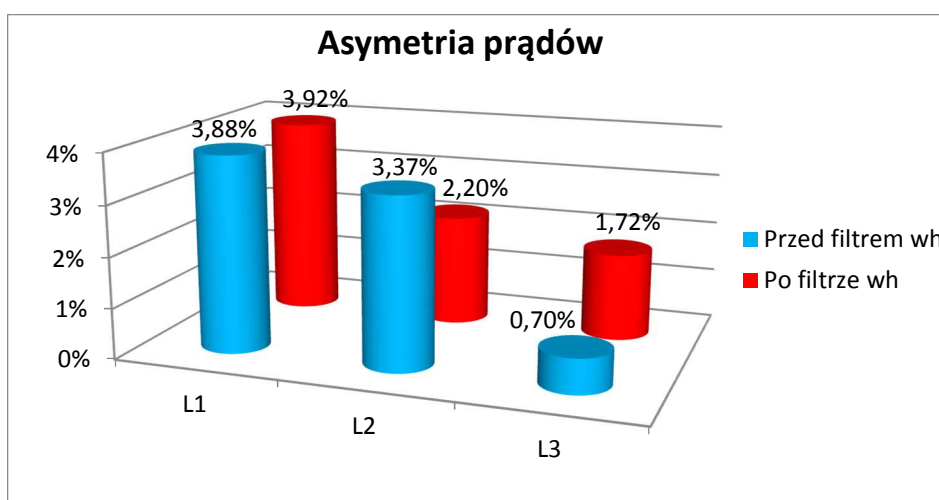
W celu sprawdzenia funkcjonalności filtru wyższych harmonicznych dokonano więc analizy przy wykorzystaniu analizatorów sieci PM870 zainstalowanych jak na rysunku 1 oraz systemu BMS (Building Management System) firmy Schneider Electric. Analizatory PM870 pozwalają na rejestrowanie amplitud i kątów poszczególnych harmonicznych do 63-ciej harmonicznej z rozdzielczością 128 próbek na okres. Badania dokonano w terminie 15-21.01.2018. Pomiary wykonano dla analizatora przed oraz za filtrem z okresem jednej minuty (co daje w sumie 251 950 wartości pomiarowych) takich wartości jak:

- asymetrię prądów w poszczególnych fazach;
- asymetrię napięć fazowych;

- THD prądów w poszczególnych fazach oraz przewodzie neutralnym;
- THD napięć fazowych;

Dodatkowo podczas pomiarów w pewnych okresach czasowych występował odzysk energii z komór testowych realizowany poprzez silniki asynchroniczne napędzane przez silniki spalinowe testowane w Centrum Technicznym oraz odpowiednie układy przekształtnikowe z tranzystorami IGBT. W chwilach tych kierunek przepływu prądu był od odzysku w kierunku sieci. Z uwagi na pracę prądnic asynchronicznych w dużym zakresie zmian prędkości obrotowej na wyjściu prądnic zastosowano dedykowane do tego celu układy przekształtnikowe.

Na podstawie wartości średnich arytmetycznych pomiarów z okresu tygodnia dokonano analizy wykresów słupkowych mierzonych wartości jak poniżej.



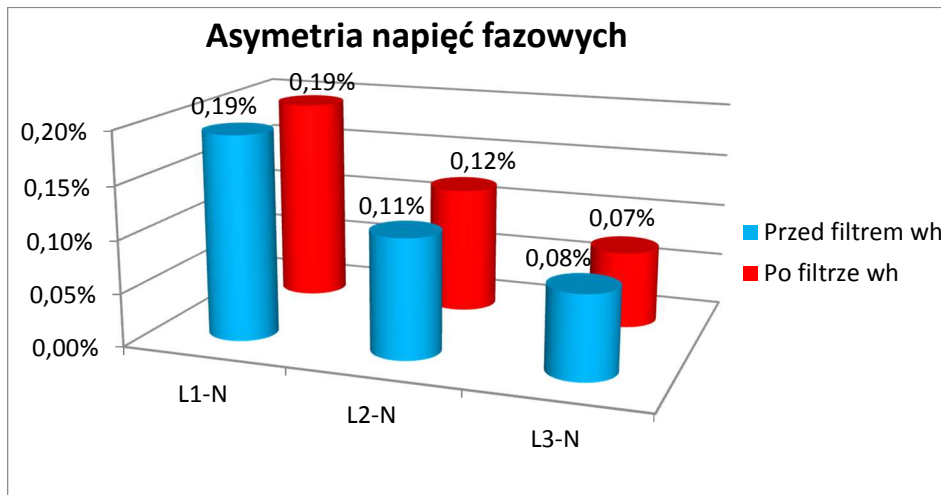
Rys. 5. Wykres słupkowy asymetrii prądów w badanej sieci

Fig. 5. The current asymmetry bar graph in the tested installation

Rysunek 5 przedstawia wartości asymetrii prądów przed oraz po filtrze aktywnym. Przy analizie asymetrii prądów należy nadmienić, że wartości te wyznaczone są jako wartości równe stosunkowi różnicy prądu fazowego do średniej prądu wszystkich faz. Z rysunku 5 wynika, że obciążenie poszczególnych faz nie jest równomierne. Różnice te są natomiast nieznaczne.

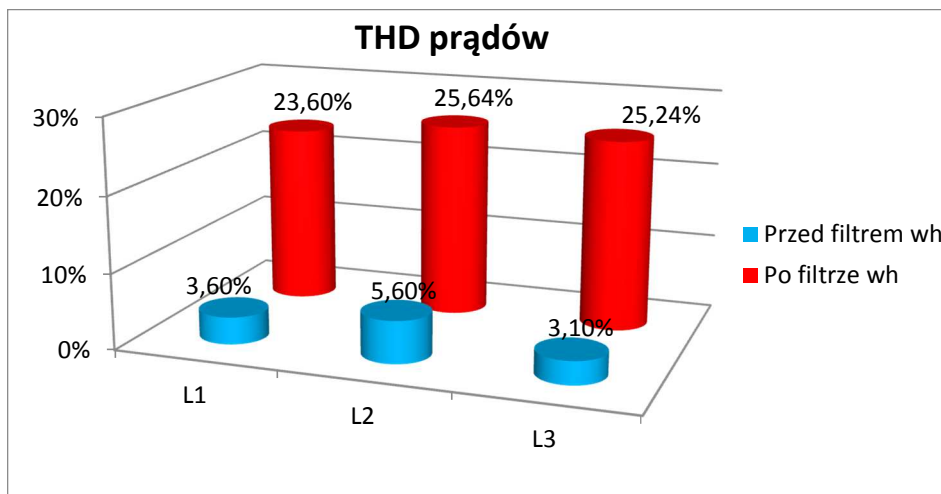
Rysunek 6 pokazuje natomiast, że asymetria napięć przed i po filtrze utrzymuje się na niemal takim samym poziomie, co świadczy o tym, że nie ma on wpływu na asymetrię napięć w sieci. Asymetria napięć to stan w systemie wielofazowym, w którym wartości skuteczne napięć międzyfazowych (składowa

podstawowa) lub kąty fazowe między kolejnymi napięciami międzyfazowymi nie są równe.



Rys. 6. Wykres słupkowy asymetrii napięć fazowych w badanej sieci

Fig. 6. Bar graph of the phase voltage unbalance in the tested installation



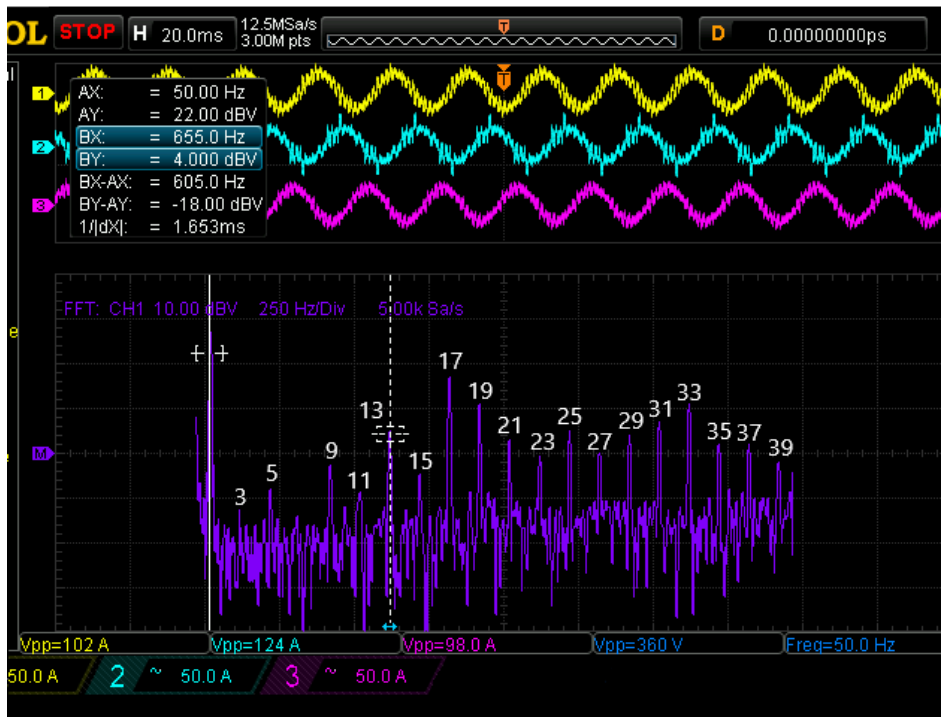
Rys. 7. Wykres słupkowy współczynnika zniekształceń harmoniczných prądów w poszczególnych fazach badanej sieci

Fig. 7. Bar graph of the harmonic distortion coefficient of currents in individual phases of the tested installation

Jak widać na rysunku 7 współczynnik zawartości THD w przebiegach prądów po filtrze aktywnym kształtuje się na znacznie wyższym poziomie niż przed filtrem co potwierdza prawidłowe działanie filtru. Przy analizie wartości związanych z zawartością THD w przebiegach prądów określono również wpływu odzysków energii na parametry sieci. W tym celu wyselekcjonowano wartości pomiarowe współczynnika THD dla poszczególnych prądów dla chwil czasowych kiedy $\cos \varphi$ był dodatni (brak odzysku energii) oraz kiedy był ujemny (odzysk energii).

Z analizy tych wyników wynika, że podczas odzysku energii zawartość THD utrzymywała się na poziomie 24-30%. Wartości te pokazują, że odzysk ten powoduje nieznaczne zwiększenie zawartości wyższych harmonicznych w stosunku do chwil, kiedy odzysk nie występuje.

Aby potwierdzić zawartość wyższych harmonicznych w przebiegach prądów nieliniowych odbiorników dokonano analizy FFT fazy L1, którą przedstawiono na rysunku 8. W celu uwidocznienia wyższych harmonicznych analiza została wykonana w skali decybelowej oraz przy wykorzystaniu okna Hanninga.



Rys. 8. Przebiegi prądów oraz analiza FFT prądu w fazie L1 nieliniowych odbiorników

Fig. 8. Current waveforms and FFT analysis of L1 current in non-linear loads

Jak można zauważyć na rysunku 8 udział wyższych harmonicznych w przebiegu prądowym odgrywa kluczowe znaczenie oraz powoduje jego odkształcenie. W przebiegu tym dominują harmoniczne od 13 do 37 co pokazuje rysunek 8. Aby określić kolejność danej harmonicznej można skorzystać z tabeli 1.

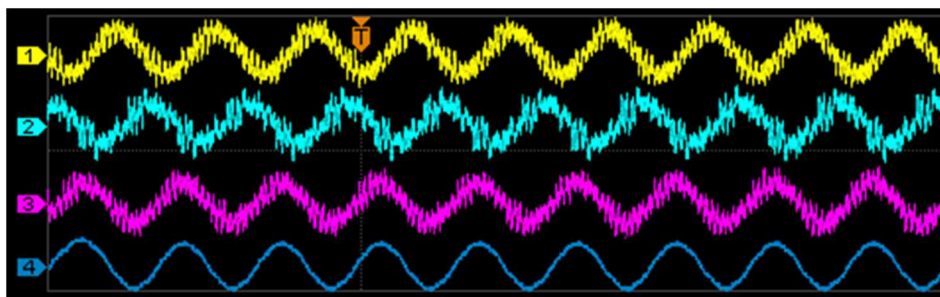
Tabela 1. Relacja pomiędzy kolejnością faz i rzędem harmonicznej, na podstawie [5]

Table. 1. Relation between phase sequence and harmonic order, based on [5]

Kolejność faz	Zgodna	Przeciwna	Zerowa
Rząd harmonicznej	1	2	3
	4	5	6
	7	8	9

	$3k+1$	$3k+2$	$3k+3$ dla $k=0,1,2,3...$

Dodatkowo dla potwierdzenia wykresu z rysunku 7 dokonano analizy przebiegów prądów przed i po filtrze aktywnym przy wykorzystaniu oscyloskopu cyfrowego.

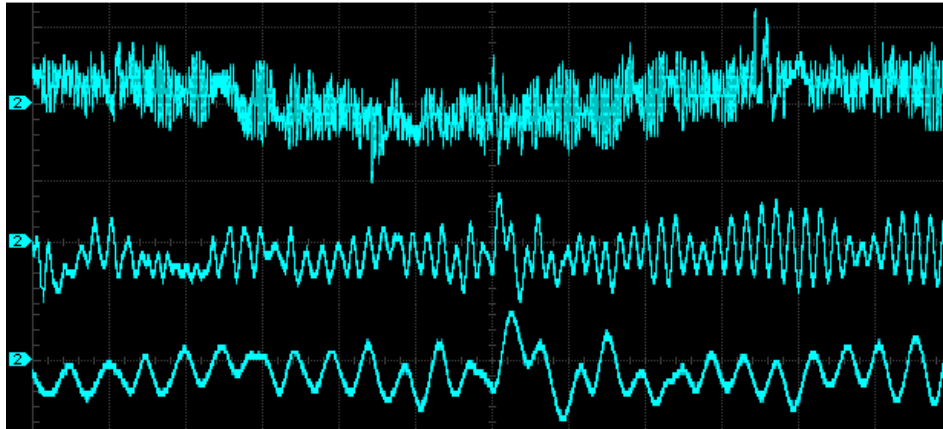


Rys. 8. Wykres przebiegów prądów w fazie L1, L2, L3 po filtrze aktywnym oraz przebieg prądu w fazie L3 przed filtrem aktywnym

Fig. 8. Diagram of current waveforms in the L1, L2, L3 phases after the active filter and the current waveform in the L3 phase before the active filter

Na rysunku 8 przedstawiono odpowiednio przebiegi prądów w fazie L1 (1), L2 (2), L3 (3). Przebiegi te potwierdzają nieliniowy charakter odbiorników energii elektrycznej. Przebieg 4 z rysunku 8 ilustruje natomiast przebieg prądu przed filtrem aktywnym. Jak widać dzięki wykorzystaniu filtra aktywnego wyższe harmoniczne prądów nieliniowych odbiorników „nie wydostają się” poza wydzieloną część sieci.

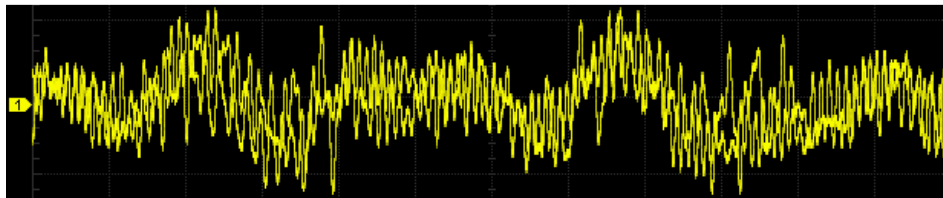
W celu łatwiejszego zrozumienia zasady generowania przebiegów dokonano również obserwacji przebiegów prądowych bezpośrednio na wyjściu filtru aktywnego.



Rys. 9. Wykres przebiegów prądu w fazie L2 na wyjściu części A filtru aktywnego

Fig. 9. Diagram of current waveforms in L2 phase at the output of active filter part A

Rysunek 9 pokazuje kształt przebiegu prądowego w fazie L2 na wyjściu części A filtru aktywnego. Przebiegi te pokazano dla różnej podstawy czasu w celu lepszego zobrazowania przebiegu. Przebieg ten dodatkowo potwierdza prawidłowe działanie filtru. Filtry tego typu generują wyższe harmoniczne, które są w przeciwfazie do wyższych harmonicznych nieliniowych odbiorników. Cechą charakterystyczną tych przebiegów jest to, że nie zawierają składowej podstawowej. Dzięki temu następuje wygaszanie tych harmonicznych z przebiegu. Zjawisko to nazywane jest interferencją destruktywną.



Rys. 10. Przebieg prądu w przewodzie neutralnym w badanej sieci

Fig. 10. Current waveform in the neutral conductor in the tested installation

Oprócz analizy prądów fazowych dokonano również analizy prądu w przewodzie neutralnym w wydzielonej części sieci co pokazuje rysunek 10.

W przebiegu tym można dostrzec obwiednię składowej podstawowej o częstotliwości 50 Hz. Składowa ta jest zniekształcona dużą zawartością wyższych harmonicznych co niekorzystnie wpływa na punkt neutralny sieci.

4. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że dla danych odbiorników nieliniowych aktywny filtr wyższych harmonicznych spełnia założony cel. Tym samym ogranicza wpływ tych odbiorników na pozostałą część sieci. Dzieje się tak na skutek wygaszanie wyższych harmonicznych generowanych przez nieliniowe odbiorniki z przebiegu przy udziale filtru aktywnego. Zjawisko to nazywane jest interferencją destruktywną. Dodatkowo zaletą tego typu rozwiązania jest możliwość wprowadzania zmian w konfiguracji sieci oraz nieliniowych odbiorników. Jedynym ograniczeniem wpływającym na poziom ograniczania wyższych harmonicznych w przebiegach prądu jest moc filtru aktywnego. Powinna być ona dopasowana do obciążenia, aby filtr mógł spełniać swój założony cel. W przeciwnym wypadku nie będzie on w stanie dostatecznie dobrze usunąć wyższe harmoniczne z przebiegów prądowych.

Z przeprowadzonych badań ponadto można wywnioskować, że zawartość wyższych harmonicznych prądu w fazie L2 jest największa w porównaniu do fazy L1 oraz L3. Może to być spowodowane obciążeniem tej fazy większą ilością jednofazowych odbiorników nieliniowych w stosunku do pozostałych faz. Dodatkowo podczas badań dokonano analizy przewodu neutralnego, co pokazało, że prądy w nim płynące również posiadają wyższe harmoniczne. Harmoniczne te negatywnie wpływają na punkt neutralny sieci.

Powyższe badania pokazują więc znaczenie ograniczania poziomu wyższych harmonicznych w takich obiektach jak centra badawczo rozwojowe czy specjalistyczne laboratoria, gdzie jakość energii elektrycznej może mieć znaczenie dla wyników badań.

Literatura

- [1] J. Czornik, M. Łukiewski: Filtry harmonicznych gwarancją kompatybilności elektromagnetycznej i wysokiej sprawności przekształtnikowych układów napędowych, ZP-ME NR106, 2/2015 r.
- [2] S. Rustemli, M. Cengiz: Active filter solutions in energy systems, Department of Electrical and Electronics Engineering, Bitlis Eren University, Bitlis, Turkey 2015 r.
- [3] D. Wojciechowski, R. Strzelecki, B. Bałkowski: Równoległy filtr aktywny sterowany predykcyjnie, Akademia Morska, Katedra Automatyki Okrętowej, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 231, 2007 r.

- [4] L. Gołębiowski, J. Lewicki: Układy elektromagnetyczne w energoelektronice, Politechnika Rzeszowska 2012 r.
- [5] Z. Hanzelka: Jakość energii elektrycznej część 4, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.

ANALYSIS AND LIMITATION OF HIGHER HARMONIC NON-LINEAR LOADS USING THE ACTIVE FILTER

S u m m a r y

The article presents results of measurements related to the limitation of higher harmonics of a non-linear loads using an active filter. At the beginning the article discusses issues related to the problem of higher harmonics filtration using passive and active filters in 0.4 kV networks. Next, analytical considerations regarding filtration of higher harmonics in a three-phase, four-wire network using an active filter are presented to demonstrate the principle of generating voltage by an active filter and showing the complexity of higher harmonics filtration process. A diagram of a separate part of the industrial installation, which was analyzed using PM870 network analyzers as well as a digital oscilloscope with the function of FFT analysis, was presented and discussed. In order to collect data from the analyzers, the BMS system installed on the site was used, which allowed to collect a large number of measured values. Thanks to the collected data it was possible to determine the levels of voltages and current asymmetry, as well as the THD content in the current waveforms before and after the higher harmonic filter. This allowed to show the real impact of the filter. In addition, FFT analysis was performed, on the basis of which one can observe and determine the contribution of individual harmonics in these runs. This analysis also allowed to determine the outflow of energy recovery using asynchronous generators on the quality of electricity. Thanks to the results obtained, it was possible to determine the impact of active filtration on a given part of the network, as well as to answer the question whether the use of this type of filtration is needed or perhaps even necessary. The article ends with the collection of conclusions from the analysis and the summary.

Keywords: higher harmonic, active filtration, the quality of electricity, FFT, BMS

DOI: 10.7862/re.2018.4

Tekst złożono w redakcji: grudzień 2017

Przyjęto do druku: grudzień 2017