

Wpływ filtrów harmonicznych na poprawę parametrów energii elektrycznej w punkcie przyłączenia

Streszczenie. Aktualnie najczęściej spotykanym rozwiązaniem w układach napędowych są przekształtniki z wejściem 6-pulsowym. W artykule wskazano na zależność prądu wejściowego przekształtnika 6-pulsowego od parametrów punktu przyłączeniowego i reaktancji szeregowych. Omówiono negatywne oddziaływanie odkształcenia przebiegu prądu na pracę elementów magnetycznych. Przedstawiono wpływ filtru harmonicznego na parametry i pracę przekształtnikowego układu napędowego.

Abstract. Nowadays, the most common solution in the drive system are converters with a 6-pulse input. Dependency of the 6-pulse converter input current on parameters of the point of common coupling and serial reactances have been shown. The work also depicts negative impact of current wave deformations on magnetic components. The effect of harmonic filters on parameters and operation of the converter drive system have been presented. (The effect of harmonic filters on improvement of electrical energy parameters at point of common coupling).

Słowa kluczowe: filtry harmoniczne, harmoniczne w układach napędowych, przekształtnikowe układy napędowe.

Keywords: harmonic filters, harmonics in drive systems, converter drive systems.

Wstęp

Światowy rynek przekształtnikowych układów napędowych należy do najbardziej dynamicznie rozwijających się. Obecnie ponad połowa energii elektrycznej zużywana przez przemysł konsumowana jest przez układy napędowe. Aktualnie coraz częściej czynnikiem decydującym o zakupie tych urządzeń jest wnikliwa analiza ekonomiczna obejmująca realny czas zwrotu inwestycji oraz analiza oddziaływania całego układu na sieć zasilającą i inne odbiorniki [1]. Współcześnie stosowane rozwiązania układów napędowych niepozbawione są wad przez co nadal są mocno rozwijane. Pogłębianą jest wiedza o występujących w nich zjawiskach elektromagnetycznych, mechanicznych, cieplnych, akustycznych i innych. Kluczowym wyzwaniem jednak wciąż wydaje się być odwieczny konflikt, a zarazem potrzeba kompromisu pomiędzy energooszczędnością, a materiałoszczędnością danego rozwiązania. Już dawno minęły czasy, gdzie standardem były zapasy konstrukcyjne. Dlatego dziś Komisja Europejska regularnie przygotowuje i wprowadza konkretne przepisy i wymagania dla poszczególnych grup urządzeń (np. EN 50598-2 lub Rozporządzenie UE nr 548/2014 - Dyrektywa EcoDesign). Zapisy te określają przede wszystkim minimalne wymagania w zakresie sprawności poszczególnych maszyn i urządzeń. Ma to uchronić przed zbyt „oszczędnym” projektowaniem urządzeń oraz poprawić efektywność energetyczną systemu i przemysłu.

Wpływ parametrów punktu przyłączeniowego na odkształcenie prądu wejściowego przekształtnika

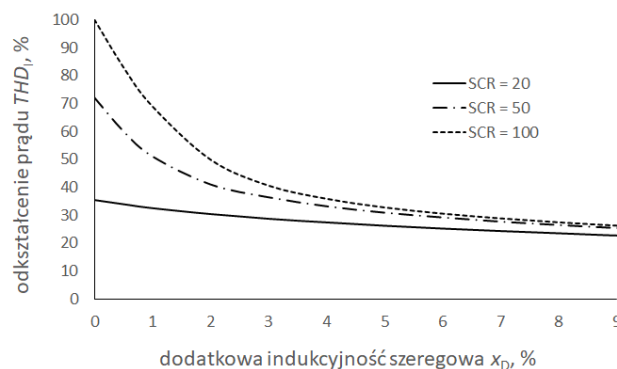
Punkt przyłączeniowy (PCC – ang. Point of Common Coupling) może być traktowany jako źródło napięcia sinusoidalnego lub jako sieć elektroenergetyczna z określoną impedancją wewnętrzną o charakterze indukcyjnym. Wyznacznikiem, który w sposób bezpośredni wiąże zależność prądu wejściowego przyłączonego przekształtnika od parametrów w punkcie przyłączenia jest współczynnik zwarcia sieci SCR (ang. short circuit ratio):

$$(1) \quad SCR = \frac{I_{SC}}{I_L}$$

gdzie: I_{SC} – prąd zwarcia w punkcie przyłączenia, I_L – prąd obciążenia w punkcie przyłączenia.

Współczynnik zwarcia sieci, określa sztywność punktu przyłączeniowego w stosunku do zasilanych odbiorników. Generalnie im większy stosunek mocy zwarcia w punkcie przyłączenia do mocy zasilanego przekształtnika,

tym sieć bardziej sztywna, a prąd pobierany z sieci przez przekształtnik bardziej odkształcony, o większej wartości skutecznej. Aby ograniczyć odkształcenie THD_i i wartość skuteczną prądu wejściowego przekształtnika należy ograniczyć prąd zwarcia w punkcie przyłączenia. Ingerencja w moc zwarcia punktu przyłączeniowego jest kosztowna i zasadniczo możliwa tylko na etapie projektu sieci. W praktyce najczęściej spotykanym i najprostszym sposobem ograniczenia odkształcenia przebiegu prądu jest zwiększenie impedancji pętli zwarcia układu napędowego. Możliwe jest to w pewnym zakresie do zrealizowania poprzez włączenie dodatkowych reaktancji szeregowych po stronie wejściowej przekształtnika (np.: transformator przekształtnikowy z odpowiednim napięciem zwarcia lub dławik sieciowy o określonej indukcyjności). Wpływ dodatkowych reaktancji w torze prądowym zasilania przekształtnika przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Wpływ dodatkowej reaktancji szeregowo na odkształcenie prądu wejściowego przekształtnika [1].

Charakterystyka ta przedstawia zależność odkształcenia prądu wejściowego przekształtnika o mocy znamionowej 250kW od mocy zwarcia w punkcie przyłączenia i dodatkowych reaktancji szeregowych. Zależność ta ma jednak charakter uniwersalny. Rozpatrzono trzy przypadki transformatorów zasilających o napięciu zwarcia $u_X=6\%$, różniące się mocą znamionową: $S_{TR} = 315\text{kVA}$ ($SCR = 20$), $S_{TR} = 1000\text{kVA}$ ($SCR = 50$), $S_{TR} = 2500\text{kVA}$ ($SCR = 100$). Przeprowadzona analiza wskazuje, że transformator przekształtnikowy i dławiki szeregowo ograniczają w pewnym stopniu oddziaływanie przekształtnika na sieć zasilającą i inne odbiorniki, co jest tylko niezbędnym minimum. Nawet wprowadzenie w szereg 5-6% dodatkowej

reaktancji ogranicza całkowity współczynnik odkształcenia THD_1 prądu tylko do około 30-35%. Natomiast stosowanie większych impedancji szeregowych nie jest praktykowane ze względu na duże spadki napięcia, a tym samym spadek mocy układu napędowego [2]. Efektywniejszym rozwiązaniem ograniczenia harmonicznych prądu przekształtnika są pasywne filtry harmonicznych. Różnicę w prądzie wejściowym układu przekształtnikowego bez filtru oraz z filtrem przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zależność wartości skutecznych prądów przekształtnika 6-pulsowego 250kW od parametru SCR w punkcie przyłączenia.

Parametry PCC		THD_1 , %	I_{RMS} , A	$I_{h(RMS)}$, A				
SCR	Filtr			1h	5h	7h	11h	13h
20	Nie	35,4	375	353	116,6	34,7	22,8	11,6
	Tak	4,9	354	353	8,9	12,3	7,0	2,9
50	Nie	74,2	459	369	232,1	138,9	25,6	26,3
	Tak	5,6	356	355	10,4	14,1	7,7	3,1
100	Nie	99,9	541	383	295,0	222,7	82,9	37,1
	Tak	5,8	357	356	10,9	14,7	7,9	3,2

W układzie z pasywnym filtrem harmonicznych bez względu na parametry zwarciove punktu przyłączeniowego uzyskano THD_1 w zakresie 5-6%, a tym samym mniejszą wartość skuteczną prądu wejściowego przekształtnika.

Wpływ odkształcenia przebiegu prądu na pracę pasywnych elementów magnetycznych

Przepływ prądu odkształconego przez elementy magnetyczne niekorzystnie wpływa na ich pracę, powodując ilościowy wzrost wydzielanych strat mocy. W zależności od zawartości harmonicznych w widmie prądu możliwe jest przybliżone obliczenie tych strat w pasywnych elementach magnetycznych, wyznaczając współczynniki strat dodatkowych i strat całkowite [3,4,5]:

a) współczynnik strat dodatkowych od wzrostu wartości skutecznej prądu

$$(2) \quad F_i^2 = \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 = \left(\frac{I_{RMS}}{I_1} \right)^2$$

gdzie: I_h – wartość prądu harmonicznej rzędu h , I_1 – wartość skuteczna podstawowej harmonicznej, h – numer harmonicznej.

b) współczynnik strat wiroprądowych w uzwojeniach (K-factor)

$$(3) \quad F_w = \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^2$$

c) współczynnik strat wiroprądowych w połączeniach i częściach konstrukcyjnych (ang. stray losses):

$$(4) \quad F_p = F_k = \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^{0,8}$$

Całkowite straty obciążeniowe w transformatorze P_C wskutek przepływu w uzwojeniach prądu odkształconego wynoszą:

$$(5) \quad P_C = P_p F_i^2 + P_w F_w + P_{dk} F_k + P_{do} F_p$$

gdzie: P_p – straty podstawowe, P_w – straty wiroprądowe w uzwojeniach, P_{dk} – straty dodatkowe w częściach konstrukcyjnych, P_{do} – straty dodatkowe w odpyłkach.

W przypadku dławików straty całkowite P_C należy uzupełnić o składową strat dodatkowych P_{FF} (ang. fringing flux), która reprezentuje straty w uzwojeniu skojarzone ze strumieniem rozproszenia wokół szczelin. Wartość tej składowej można ograniczać stosując rdzenie wieloszczelinowe lub stosując w miejsce szczeliny powietrznej materiał magnetyczny o bardzo niskiej przenikalności μ_r . Natomiast straty podstawowe w rdzeniu dławika należy powiększyć o straty P_G w szczelinie będące zależnością [6]:

$$(6) \quad P_G = K_g \frac{n_g l_g w}{\rho} f B^2$$

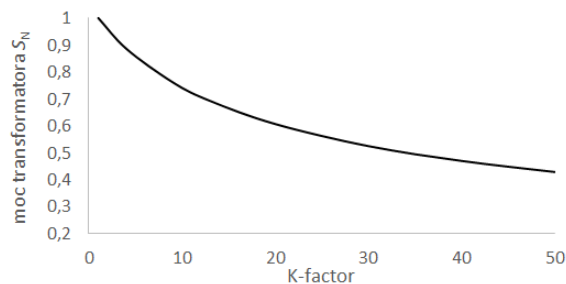
gdzie: K_g – współczynnik empiryczny zależny od konstrukcji rdzenia, n_g – liczba szczelin powietrznych, l_g – długość szczelin, w – szerokość taśmy, ρ – rezystywność materiału rdzenia, f – częstotliwość, B – amplituda indukcji.

Odształcenie prądu obciążenia powoduje, że straty dodatkowe w elementach magnetycznych mogą wzrosnąć nawet kilkakrotnie (tab. 2). W konsekwencji wzmożonego wydzielania ciepła i bezpośredniego wzrostu temperatury żywotność urządzeń spada, w skrajnych przypadkach powodując ich uszkodzenie. W wyniku tego elementy magnetyczne do współpracy z prądami odkształconymi muszą być termicznie przewymiarowane zależnie od stopnia odkształcenia prądu (obniżona indukcja w rdzeniu, zwiększony przekrój materiału nawojowego, stosowanie przeplotów uzwojenia, itd.), ewentualnie ich moc znamionowa musi zostać ograniczona.

Tabela 2. Wpływ odkształcenia prądu na straty dodatkowe w elementach magnetycznych na przykładzie przekształtnika 250kW.

	SCR = 100	SCR = 50	SCR = 20	Filtr pasywny
THD_1	99,7%	74,2%	35,4%	5%
F_i^2	1,99	1,55	1,12	1,01
F_w (K-factor)	43,9	20,8	5,53	1,19
$F_p = F_k$	5,23	3,21	1,49	1,01

Szacunkowego przeznaczenia mocy można dokonać na podstawie współczynnika K-factor (rys. 2), który wyrażony jest jako suma kolejnych kwadratów iloczynu wartości skutecznej i rzędu harmonicznej. Należy jednak podkreślić, że nie ograniczymy w ten sposób ani podstawowych, ani dodatkowych strat mocy. Przeciwdziałamy jedynie ich skutkom kosztem większego i droższego urządzenia. Tylko ograniczenie wyższych harmonicznych w widmie prądu do odpowiednio niskiego poziomu pozwoli zredukować straty dodatkowe. To z kolei poprawia sprawność całego układu.



Rys. 2. Stopień przeznaczenia mocy transformatora w zależności od współczynnika K-factor [1].

Metody eliminacji oraz dopuszczalne poziomy emisji harmonicznych prądu

Istnieje wiele metod eliminacji i ograniczania harmonicznych w prądzie wejściowym przekształtników. Począwszy od prostych dławików AC i DC, układów wielopulsowych, filtrów pasywnych i na skomplikowanych układach aktywnych kończąc. Każda z technik filtrowania charakteryzuje się różną skutecznością tłumienia harmonicznych, różnymi stratami, różnymi kosztami zakupu i eksploatacji (tab. 3).

Dławiki AC oraz DC są najtańszą metodą ograniczenia harmonicznych w prądzie zasilania, a przez to również wartości skutecznej tego prądu, niestety jest to dziś niewystarczające minimum, które nie spełnia obowiązujących standardów.

Tabela 3. Porównanie skuteczności i względnych kosztów różnych metod eliminacji harmonicznego prądu.

Metoda ograniczania harmonicznego prądu	Odształcenie prądu (THD_i)	Względny koszt
Układy bez filtracji	60 – 120 %	1
2% dławiki AC lub DC	30 – 60 %	2
4% dławiki AC lub DC	25 – 45 %	3
Układy 12-pulsowe	10 – 15 %	4
Filtry pasywne	5 – 8 %	4
Układy 18-pulsowe	4 – 6 %	5
Filtry aktywne	3 – 5 %	5

W układach wielopulsowych dzięki przesunięciom fazowym pomiędzy uzwojeniami wtórnymi transformatora istnieje możliwość eliminacji poszczególnych harmonicznym (w układzie 12-pulsowym eliminujemy 5 i 7 harmoniczną, natomiast w układzie 18-pulsowym dodatkowo 11 i 13). Główną wadą układów wielopulsowych jest ich wrażliwość na niesymetrię obciążenia oraz nierównowagę lub odształcenie napięcia zasilania. Wówczas nie jest możliwe skuteczne ograniczenie harmonicznym (5,7 oraz 11 i 13). Powoduje to, że THD_i prądu wzrasta powyżej zakładanych wartości co w wielu przypadkach może prowadzić do niespełnienia zakładanych parametrów.

Filtry zarówno pasywne, jak i aktywne są częściowo odporne na niesymetrię napięcia zasilającego, a ich właściwości tłumienne pozwalają na spełnienie restrykcyjnych norm napięcia i prądu w punkcie przyłączenia. Przewagą filtrów aktywnych jest utrzymywanie niskiego poziomu THD_i prądu w pełnym zakresie obciążenia, ale ma to bezpośrednie odzwierciedlenie w cenie zakupu takiego urządzenia.

Dzisiaj nie trzeba nikogo przekonywać, że ograniczanie czy eliminacja harmonicznym jest koniecznością. Pozostaje jednak wątpliwość jaką metodę wybrać i jakie standardy powinniśmy spełniać aby uniknąć niepotrzebnych problemów i kosztów. Obecne uregulowania normatywne i rozporządzenia w zakresie emisji harmonicznym dotyczą przede wszystkim harmonicznym napięcia w punkcie przyłączenia (EN 50160, EN 61000-2-2, EN 61000-2-4), a rzadziej w prądzie (EN 61000-3-2, EN 61000-3-12) [7]. Należy jednak pamiętać, że zniekształcenie napięcia jest powodowane właśnie przez harmoniczne w prądzie generowanym przez nieliniowe odbiorniki. Dlatego coraz częściej spotyka się wymagania ograniczenia poziomu emisji harmonicznym zarówno prądu jak i napięcia w punkcie przyłączenia zgodnie z normą IEEE 519-2014 [8]. Jest to standard obejmujący swoim zakresem wszystkie sieci, poziomy napięć oraz prądów w punkcie przyłączenia (tab. 4, tab. 5). Różnicuje on również wymagania dopuszczalnego THD_i prądu oraz poszczególnych harmonicznym w zależności od sztywności sieci i mocy zainstalowanej w punkcie przyłączenia.

Tabela 4. Dopuszczalne limity odształcenia harmonicznym prądu dla wszystkich urządzeń w punkcie przyłączenia w zależności od I_{sc}/I_n według IEEE 519-2014

I_{sc}/I_n	h						THD_i
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq 50$		
< 20	4%	2%	1,5%	0,6%	0,3%	5%	
$20 < 50$	7%	3,5%	2,5%	1%	0,5%	8%	
$50 < 100$	10%	4,5%	4%	1,5%	0,7%	12%	
$100 < 1000$	12%	5,5%	5%	2%	1%	15%	
> 1000	15%	7%	6%	2,5%	1,4%	20%	

Tabela 5. Dopuszczalne limity harmonicznym napięcia w punkcie przyłączenia według IEEE 519-2014

Napięcie w punkcie PCC	Indywidualne harmoniczne	THD_U
$U \leq 1kV$	5,0%	8,0%
$1kV < U \leq 69kV$	3,0%	5,0%
$69kV < U \leq 161kV$	1,5%	2,5%
$161kV < U$	1,0%	1,5%

Wpływ filtrów harmonicznym na sprawność i niezawodność układu napędowego

Sprawność maszyny elektrycznej to stosunek mocy oddawanej przez tą maszynę (P_{OUT}) do mocy przez nią pobieranej (P_{IN}). Pozwala to określić całkowite straty mocy maszyny. Podobnie jest w przypadku określania sprawności i strat przekształtnikowych układów napędowych. Jednak tutaj problem ten staje się bardziej złożony z uwagi na to, że układy te składają się zazwyczaj z kilku maszyn i urządzeń będących dodatkowo zależnych względem siebie. Przykładowo, sprawność układu na rysunku 5 możemy wyznaczyć w następujący sposób:

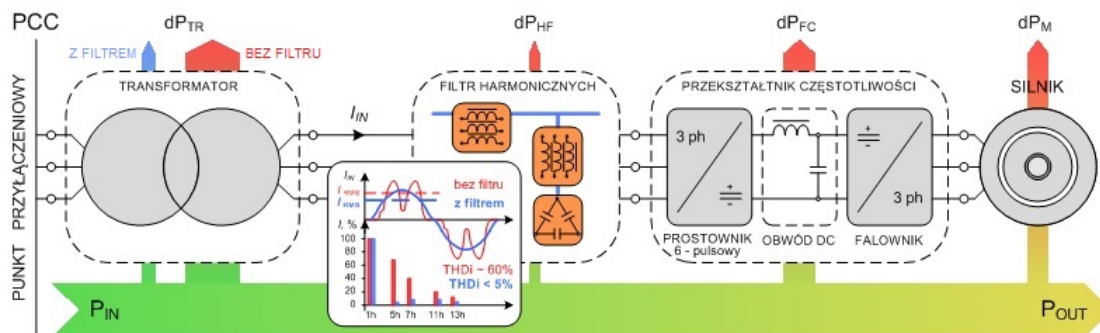
$$(7) \quad \eta_{Drive}^{System} = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = \frac{P_{OUT}}{P_{OUT} + \Delta P_{Total}^{Losses}}$$

gdzie: $\Delta P_{Total}^{Losses}$ - suma strat składowych układu napędowego.

Równie jest to iloczynowi sprawności poszczególnych elementów składowych układu napędowego począwszy od punktu przyłączeniowego (PCC):

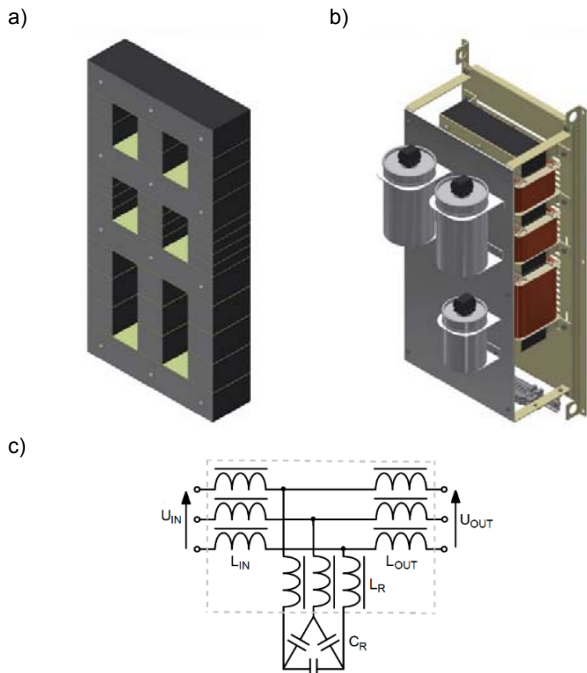
$$(8) \quad \eta_{Drive}^{System} = \eta_{Tr} \cdot \eta_{HF} \cdot \eta_{FC} \cdot \eta_M$$

W praktyce jednak często zagadnienie sprawności przekształtnikowego układu napędowego rozpatrywane jest błędnie, bez uwzględnienia oddziaływania przekształtnika na transformator, sieć i inne odbiorniki. Obniża to jakość zasilania i efektywność energetyczną całego systemu. Aby tego uniknąć każdy przekształtnik powinien być odseparowany i wyposażony w urządzenie ograniczające emisję harmonicznym do sieci zasilającej.



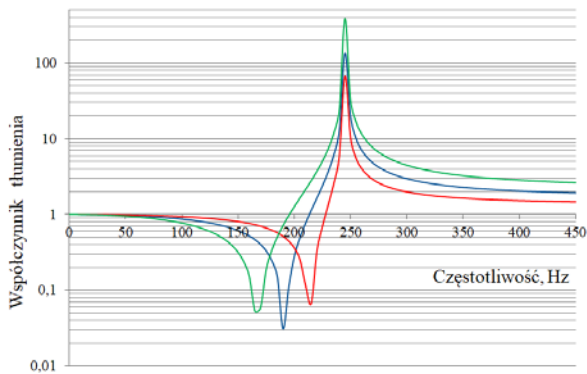
Rys. 3. Rozpylenie strat mocy w typowym przekształtnikowym układzie napędowym w układzie z filtrem oraz bez filtru harmonicznym [9].

Ze względu na wysoką tłumienność i sprawność pasywne filtry harmoniczných stanowią optymalną alternatywę (skuteczność filtracji do kosztu aplikacji) w porównaniu do pozostałych metod eliminacji harmoniczných w prądzie wejściowym układów przekształtnikowych (tab. 3). Skuteczność filtracji pasywnych filtrów harmoniczných jest zbliżona do układów 18-pulsowych, a zależność tłumienności od poziomu obciążenia i nierównoważenia napięcia zasilania jest mniejsza niż w układach wielopulsowych. Obecne filtry pasywne to już nie tylko dostrojona do pojedynczej harmoniczných kombinacja dławika i kondensatora. Coraz częściej to zaawansowane połączenie zespołu dławików i kondensatorów do tłumienia określonego zakresu harmoniczných. Standardem stają się kompaktowe rozwiązania wielodławikowe, wykonane na wspólnym rdzeniu ferromagnetycznym (rys. 4) [9].



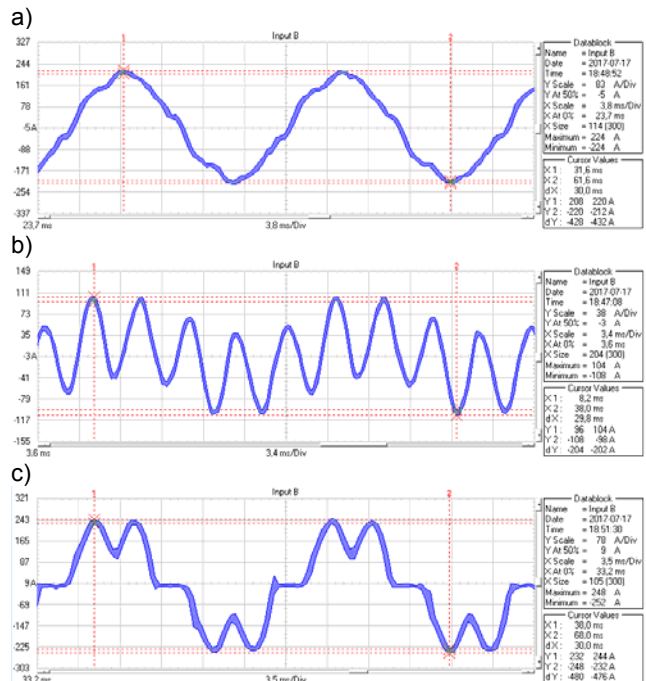
Rys. 4. Filtr harmoniczných EF3H o mocy 55kW: a) budowa rdzenia wielodławikowego o wspólnych jarzmach, b) kompaktowa konstrukcja filtra harmoniczných, c) schemat ideowy filtra [9].

Konstrukcja wspólnego rdzenia magnetycznego (wspólne jarzma) w filtrze wielodławikowym przyczynia się do ograniczenia gabarytów i masy urządzenia. Indukcyjności poszczególnych dławików pozwalają odpowiednio kształtować charakterystykę tłumienności filtra (rys. 5).



Rys. 5. Charakterystyki tłumienności filtra wielodławikowego [9].

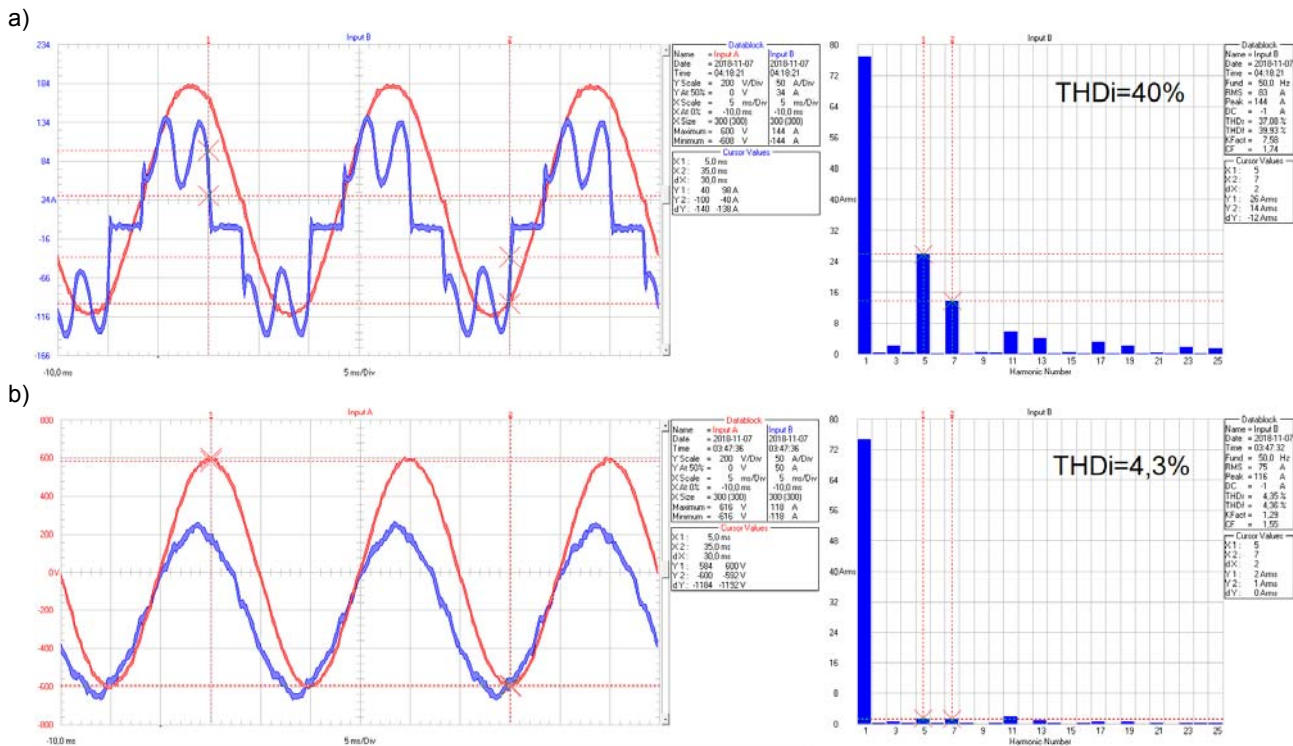
Dławik równoległy wraz z baterią kondensatorów tworzy pułpkę rezonansową na określonej harmoniczných. Dławiki szeregowo (wejściowy i wyjściowy) kształtują szerokość pasma tłumienia oraz wstępnie ograniczają harmoniczných wyższego rzędu. Indukcyjności dławików i pojemności kondensatorów są tak zestrojone, aby filtr osiągał tłumienność w szerokim zakresie obciążenia oraz odpowiedni rozptył prądów w poszczególnych dławikach (rys. 6).



Rys. 6. Pomiar rozptyłu prądów w trójdławikowym filtrze harmoniczných EF3H o mocy 110kW: a) w dławiku wejściowym L_{IN} , b) w dławiku rezonansowym L_R , c) w dławiku wyjściowym L_{OUT} [9].

Istotnym parametrem jest również pobór prądu pojemnościowego w przypadku braku obciążenia lub gdy obciążenie to jest niewielkie. Konstrukcja i optymalizacja parametrów filtrów wielodławikowych pozwala na obniżenie prądu pojemnościowego nawet poniżej $I_C < 15\%I_N$ prądu znamionowego, co jest zwłaszcza istotne w przypadku zasilania generatorowego spotykanych najczęściej na statkach czy polach naftowych. Mniejsze pojemności w obwodzie równoległym filtra powodują konieczność zastosowania większej indukcyjności równoległej, aby zachować warunek rezonansu oraz większej indukcyjności wejściowej, aby poprawić charakterystykę tłumienności całego filtra. Większe indukcyjności oznaczają większą masę i straty, a tym samym mniejszą sprawność filtra. W przypadku filtrów wielodławikowych na wspólnym rdzeniu wieloszczelinowym efekt ten nie jest tak widoczny.

W oparciu o typowe moce układów przekształtnikowych powstają odpowiadające im rodziny filtrów harmoniczných, które spełniają wymagania tłumienności zgodnie ze standardem IEEE 519-2014 bez względu na parametry punktu przyłączeniowego. Na rysunku 7 przedstawiono wyniki pomiarów zawartości harmoniczných w prądzie wejściowym przekształtnika 55kW w układzie bez filtra oraz w układzie z wielodławikowym filtrem harmoniczných EF3H-55kW 380-415V±10% T40F. Zastosowanie filtra harmoniczných w układzie zasilania przepompowni pozwoliło obniżyć THD_1 w prądzie z wartości 40% do poziomu poniżej 4,5%, eliminując tym samym negatywne oddziaływanie prądu odkształconego na pozostałe odbiorniki w sieci.



Rys. 7. Pomiar harmonicznych prądu wejściowego przekształtnika 55kW w układzie: a) bez filtru harmonicznych, b) z filtrem trój-dławikowym na wspólnych jarmach typu EF3H-55kW 380-415V±10% T40F [9].

Podsumowanie

Koszt przekształtnikowego układu napędowego to stosunkowo niewielki nakład wydatków jakie ponosi użytkownik na jego pracę w trakcie całego okresu eksploatacji. Warto zatem bliżej przyjrzeć się sprawności całego układu, jego oddziaływania na sieć i inne odbiorniki. Obecnie można znaleźć szereg uregulowań normatywnych, które pomagają utrzymać jakość energii elektrycznej w punkcie przyłączenia. Transformatory przekształtnikowe czy dławiki szeregowe nie rozwiązują wszystkich problemów i nie są w stanie ograniczyć emisji harmonicznych prądu do odpowiednio niskiego poziomu. Prawidłowa analiza zawartości harmonicznych w prądzie wejściowym przekształtnika ma szczególne znaczenie w doborze i bilansowaniu cieplnym elementów magnetycznych z nim współpracujących. Przewymiarowane transformatory to marnotrawstwo energii – rozsądniej redukować harmoniczne niż przeciwdziałać ich skutkom. Rosnąca świadomość klientów oraz zapotrzebowanie na urządzenia do redukcji harmonicznych sprawiają, że pasywne filtry harmonicznych są nadal mocno rozwijane i optymalizowane, co zwiększa ich konkurencyjność. Zastosowanie filtrów harmonicznych nie tylko przyczynia się do obniżenia kosztów energii elektrycznej, ale również w znaczący sposób poprawia wydajność i niezawodność przekształtnikowego układu napędowego.

Artykuł zrealizowano w ramach RPO WSL 2014-2020: "Nowoczesne, energooszczędne układy przetwarzania energii elektrycznej wolne od harmonicznych generowanych przez przekształtniki mocy" - WND-RPSL.01.02.00-24-0548/17.

Autorzy: mgr. inż. Jarosław Czornik, ELHAND Transformatory Sp. z o.o., ul. Klonowa 60, 42-700 Lubliniec, E-mail: j.czornik@elhand.pl; dr inż. Maciej Haltof, ELHAND Transformatory Sp. z o.o., ul. Klonowa 60, 42-700 Lubliniec, E-mail: m.haltof@elhand.pl.

LITERATURA

- [1] Czornik J., Haltof M., Filtry harmonicznych w przekształtnikowych układach napędowych, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, (2019), nr 67, 33-38
- [2] Czornik J., Łukiewski M., Filtry harmonicznych gwarancją kompatybilności elektromagnetycznej oraz wysokiej sprawności przekształtnikowych układów napędowych, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, (2015), nr 2, 51-58
- [3] Wolnik P., Sobota J., Wpływ występowania wyższych harmonicznych w prądzie obciążenia transformatora dystrybucyjnego na sposób jego eksploatacji, *Konferencja – Zarządzanie eksploatacją transformatorów*, Wisła – Jawornik (2012), 99-107
- [4] Rak J., Gała M., Jagiela K., Kępiński M., Analiza obciążenia i strat w transformatorach przekształtnikowych układów napędowych, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, (2011), nr 89, 139-147
- [5] PN-EN 61378-1:2000 „Transformatory przekształtnikowe. Transformatory do zastosowań przemysłowych”
- [6] Rylko M., Lyons B., Hayes J., Egan M., Revised magnetics performance factors and experimental comparison of high-flux materials for high-current DC-DC inductors, *IEEE Trans. Power Electronics*, 26 (2011), n.8, 2112–2126
- [7] Pozowski A., Nowe trendy ochrony sieci zasilających przed wyższymi harmonicznymi prądu i napięcia przy zasilaniu z przenienników częstotliwości, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, (2008), nr 79, 57-62
- [8] IEEE 519-2014 - IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems
- [9] ELHAND Transformatory Sp. z o.o., Materiały i opracowania własne, Lubliniec (2019)