

Piotr MYSIAK¹, Ryszard STRZELECKI²

Akademia Morska w Gdyni(1,2), Instytut Elektrotechniki (2)

System zasilania z beztransformatorowym prostownikiem 18-pulsowym zintegrowanym z szeregowym filtrem aktywnym – badania laboratoryjne

Streszczenie: W artykule omówiono działanie oraz wybrane rezultaty badań eksperymentalnych 18-pulsowego beztransformatorowego przekształtnika AC-DC, wspomaganego szeregowym energetycznym filtrem aktywnym małej mocy. Do realizacji przekształtnika 18-pulsowego stosuje się 3-fazowe dławiki sprzężone o mocy gabarytowej znacznie mniejszej niż odpowiednich transformatorów wielouzwojeniowych. Integracja układu filtra aktywnego pozwala przy tym znacznie zredukować odkształcenia prądu pobieranego z sieci w różnych warunkach zasilania, co prowadzi do tzw. warunków CPC przetwarzania energii elektrycznej.

Słowa kluczowe: energetyczne filtry aktywne, przekształtniki wielopulsowe, dławiki sprzężone, układy kondycjonowania energii elektrycznej

Wprowadzenie

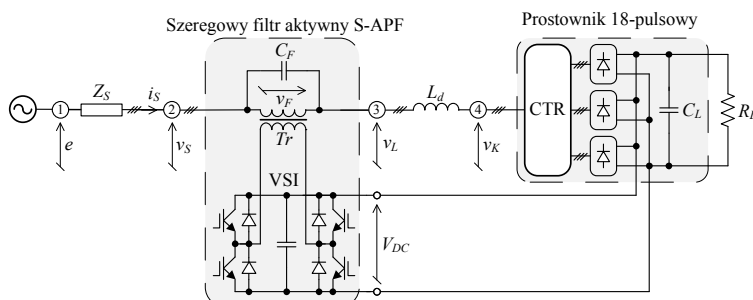
Jakość odbioru energii elektrycznej (EE) jest szczególnie ważnym zagadnieniem w przypadkach systemów zasilania o relatywnie małych mocach zwarciovych [1,2], np. w systemach autonomicznych, w tym na statkach. W istniejących instalacjach poprawę jakości odbioru EE osiąga się przy tym, zazwyczaj, przez dołączenie dodatkowych urządzeń filtracyjno-kompensacyjnych [3-5]. Natomiast, w instalacjach nowoprojektowanych dąży się do zastosowania odbiorników o współczynniku mocy $\gamma \approx 1$, tj. przesunięciu fazowym φ i współczynniku odkształcenia $THD(I)$ pobieranego prądu sieci, bliskich zero. Wśród nich, ze względu na obszar aplikacji, szczególna rola przypada przekształtnikom AC-DC pracującym w warunkach zbliżonych do CPC (Clean Power Converter) [6-9]. W miarę możliwości stosuje się przy tym prostowniki diodowe.

W pracach [10,11] przedstawiono beztransformatorowy 18-pulsowy prostownik diodowy z dławikami sprzężonymi, o właściwościach zbliżonych do CPC, przeznaczony zwłaszcza dla sieci LV. Prostownik ten w warunkach znamionowych cechuje się jakością odbioru EE podobną do innych 18-pulsowych przekształtników CPC z transformatorami i autotransformatorami. Jego główną zaletą jest natomiast znacznie mniejsza moc gabarytowa elementów elektromagnetycznych i całego urządzenia. Prostownik z dławikami sprzężonymi jest jednak mało odporny na zaburzenia napięcia w sieci zasilającej. Autorzy proponują podwyższenie tej odporności i dodatkowo zmniejszenie odkształcenia prądu sieci, poprzez dołączenie zintegrowanego szeregowego filtra aktywnego (S-APF) małej mocy. Omówienie właściwości takiego zintegrowanego rozwiązania jest głównym celem niniejszego referatu.

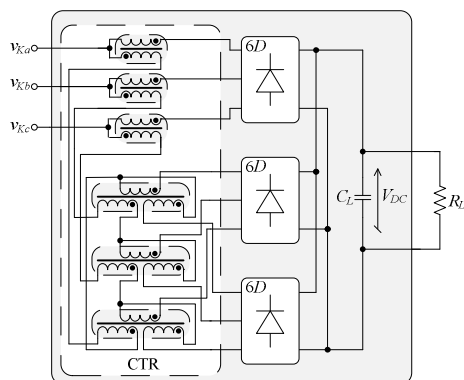
Zasada działania proponowanego systemu zasilania

Na Rys.1 pokazano schemat ogólny proponowanego systemu zasilania AC-DC, zbudowanego w oparciu o 18-pulsowy prostownik z dławikami sprzężonymi CTR (Rys.2). Prostownik ten jest zintegrowany z szeregowym energetycznym filtrem aktywnym (S-APF) niedużej mocy (Rys.3), w którym zastosowano trzy jednofazowe

falowniki mostkowe (z transformatorami dodawczymi Tr i kondensatorami filtrującymi C_F) połączone obwodami DC z wyjściem prostownika. Jak łatwo zauważyć, zastosowany układ S-APF umożliwia implementację 3-poziomowych algorytmów PWM. W badanej aplikacji S-APF nie wymaga również regulacji przepływu mocy czynnej pomiędzy obwodem DC a prostownikiem. Wynika to z bardzo małego przepływu mocy czynnej pomiędzy tymi składowymi systemu zasilania, mającego przy tym tendencję do ograniczania samostabilizującego się [12].



Rys.1. Schemat proponowanego zintegrowanego systemu zasilania z układem S-APF



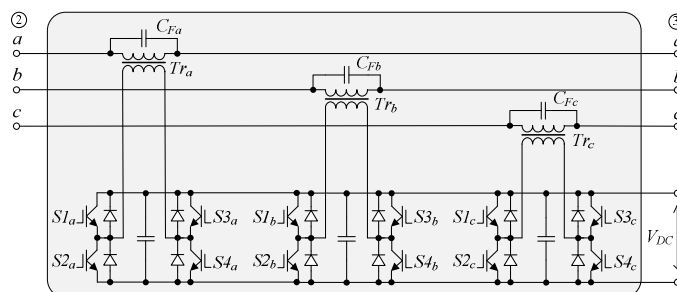
Rys.2. Topologia stosowanego prostownika 18-pulsowego z dławikami sprzężonymi (CTR)

Układ S-APF w systemie zasilania przedstawionym na Rys.1 jest sterowany na zasadzie blokowania niepożądanych harmonicznych wydzielanych w układzie sterownika, którego prosty przykład pokazano na Rys.4. Dla tych składowych S-APF powinien przedstawiać bardzo dużą impedancję (w założeniu nieskończoność), a dla harmonicznej podstawowej impedancję bardzo małą (w założeniu zerową). Dlatego, napięcie dodawcze v_F w każdej fazie (Rys.1) powinno być proporcjonalne do niepożądanych składowych prądu i_S w tej samej fazie. Tą zasadę sterowania wyraża wzór:

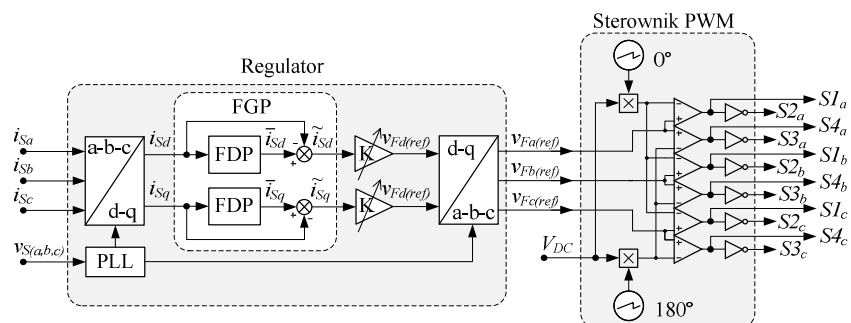
$$(1) \quad v_F = K \times \tilde{i}_S$$

gdzie: K – współczynnik proporcjonalności w $[\Omega]$.

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012



Rys. 3. Układ zintegrowanego szeregowego filtra aktywnego (S-APF).



Rys. 4. Przykładowy sterownik układu S-APF

W układzie 3-fazowym uwzględniamy, że:

$$v_F = [v_{Fa(ref)}(j\omega), v_{Fb(ref)}(j\omega), v_{Fc(ref)}(j\omega)]^T$$

$$\tilde{i}_S = G(j\omega) \times [i_{Sa}(j\omega), i_{Sb}(j\omega), i_{Sc}(j\omega)]^T$$

oraz

$$G(j\omega) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot H(j\omega) \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

gdzie: $H(j\omega)$ – transmitancja filtra górnoprzepustowego (FGP) wydzielającego blokowane harmoniczne prądu sieci w układzie współrzędnych α - β . Od tej transmitancji zależą podstawowe właściwości blokujące S-APF. W układach 3-fazowych racjonalnymi są przy tym realizacje $H(j\omega)$ z zastosowaniem przekształcenia Clarka-Parka [3,5].

W przypadku sterownika na Rys.4, FGP jest realizowany we współrzędnych wirujących d - q na podstawie różnicy składowych wydzielanych przez filtr dolnoprzepustowy (FDP) 1-go rzędu a sygnał nieodfiltrowany. Dla takiego rozwiązania, $H(j\omega)$ w układzie α - β ma postać:

$$(2) \quad H(j\omega) = \frac{\begin{bmatrix} \omega_C + j\omega & -\omega_S \\ \omega_S & \omega_C + j\omega \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} j\omega & \omega_S \\ -\omega_S & j\omega \end{bmatrix}}{\omega_S^2 + (\omega_C + j\omega)^2}$$

gdzie: ω_S – częstotliwość sieci, ω_C – częstotliwość odcięcia FDP.

Wadą transmitancji (2) są silne sprzężenia skrośne pomiędzy między odfiltrowanymi składowymi harmonicznymi prądów i_{Sa} , i_{Sb} . Korzystniejszą jest transmitancja $H(j\omega)$, którą realizuje się poprzez wydzielenie w FDP we współrzędnych $d-q$ wyłącznie składowych stałych [5]. Na ich podstawie oraz odwrotnego przekształcenia Parka są wyznaczone przebiegi sinusoidalne we współrzędnych $\alpha-\beta$. Różnica otrzymanych przebiegów sinusoidalnych i przebiegów nieodfiltrowanych we współrzędnych $\alpha-\beta$ jest rezultatem filtracji. W tym przypadku transmitancja $H(j\omega)$ wyraża się zależnością:

$$(3) \quad H(j\omega) = 1 - \frac{\begin{bmatrix} \omega_C + j\omega & -\omega_S \\ \omega_S & \omega_C + j\omega \end{bmatrix} \cdot \omega_C}{\omega_S^2 + (\omega_C + j\omega)^2}$$

Wspólną wadą transmitancji $H(j\omega)$ opisanych wzorami (2) i (3), związaną z możliwą niesymetrią napięcia zasilania, jest częściowe nieodfiltrowanie składowej kolejności przeciwnej o częstotliwości harmonicznej podstawowej. Skutkuje to częściowym blokowaniem tej składowej, co zawyża moc gabarytową układu S-APF. Dlatego, racjonalna jest realizacja transmitancji $H(j\omega)$ w sposób podobny do opisanej wzorem (3), lecz oddzielnie dla składowych kolejności zgodnej i przeciwnej. Stosując takie rozdzielanie otrzymujemy:

$$(4) \quad H(j\omega) = \frac{\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot [(j\omega)^2 + \omega_S^2 - \omega_C^2]}{\omega_S^2 + (\omega_C + j\omega)^2}$$

W tym przypadku składowe i_{Sa} i i_{Sb} są filtrowane jednakowo. W rezultacie, stosując FGP o transmitancji (4), napięcia dodawcze v_F w każdej fazie określa zależność:

$$v_{F(a,b,c)} = K \cdot \frac{[(j\omega)^2 + \omega_S^2 - \omega_C^2]}{\omega_S^2 + (\omega_C + j\omega)^2} \cdot i_{S(a,b,c)}$$

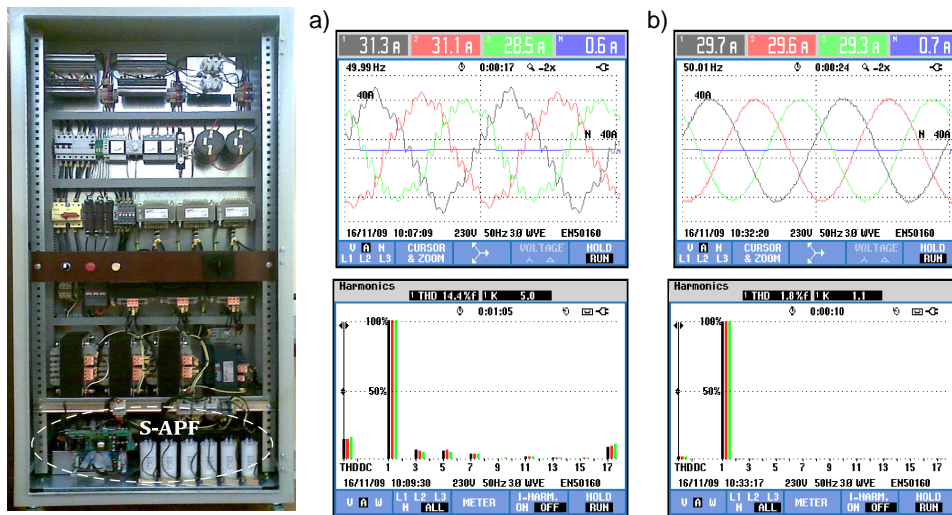
Badania laboratoryjne

Głównym celem badań eksperymentalnych było praktyczne sprawdzenie skuteczności działania proponowanego systemu (Rys.1) w stanach ustalonych. Badania przeprowadzono dla przypadku integracji S-APF z prostownikiem 18-pulsowym o mocy $S_{REC}=20$ [kVA], z zastosowaniem dodatkowego dławika sieciowego $L_d = 0,6$ [mH].

Fotografia na Rys.5 przedstawia model laboratoryjny systemu zasilania zintegrowanego konstrukcyjnie z S-APF umieszczonym u dołu szafy. W systemie zastosowano transformatory dodawcze Tr (Rys.3) o przekładni 1:12. W związku z tym, z uwagi na wartość napięcia $V_{DC} \approx 500$ [V], amplituda napięć dodawczych u_F nie przekracza 45V. Zarejestrowane w znamionowych warunkach pracy tego modelu przebiegi prądów fazowych i_{Sa} , i_{Sb} , i_{Sc} oraz ich widma, przed i po załączeniu S-APF, pokazano na Rys.5a,b. Na Rys.6 i Rys.7 pokazano również wyniki rejestracji wielkości analogicznych jak na Rys.5a,b, z tą różnicą, że dotyczą 75% i 125% obciążenia znamionowego. Ich analiza jednoznacznie potwierdza wysoką skuteczność proponowanego rozwiązania do poprawy kształtu prądu sieci. Łatwo też zauważyć, że prawie połowę objętości szafy montażowej (Rys.5) zajmują pomocnicze elementy

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

łączeniowe. Wskazuje to na możliwość również zwartej konstrukcji podobnych systemów, o dobrych wskaźnikach maso-gabarytowych.

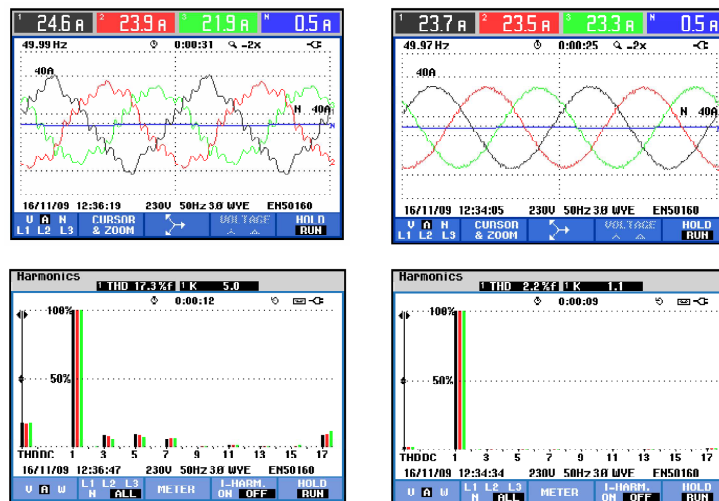


Rys.5. Widok modelu laboratoryjnego badanego systemu zintegrowanego systemu zasilania oraz oscylogramy i widma prądów sieci $i_{Sa,b,c}$ w systemie o mocy $S_{REC}=20$ kVA (obciążenie znamionowe) z dławikiem $L_d=0,6$ [mH]: a) przed włączeniem S-APF, b) po włączeniu S-APF.

Tab. 1. Kąty przesunięcia fazowego i wartości skuteczne prądów zasilających i_s , oraz wartości $\cos\varphi_{AV}$ w układzie eksperymentalnym, w przypadkach 75%, 100 % i 125% obciążenia znamionowego.

S-APF	$\frac{\varphi_a [^\circ]}{I_{Sa} [A]}$	$\frac{\varphi_b [^\circ]}{I_{Sb} [A]}$	$\frac{\varphi_c [^\circ]}{I_{Sc} [A]}$	$\cos\varphi_{AV}$
Load 75%				
On	20/23,7	18/23,5	19/23,3	0,946
Off	18/24,6	11/23,9	16/21,9	0,966
Load 100%				
On	16/29,3	16/29,5	17/29,7	0,959
Off	11/28,2	8/31	13/31,1	0,983
Load 125%				
On	15/33,8	14/33,7	15/33,5	0,967
Off	11/37,8	5/37,3	8/34,7	0,991

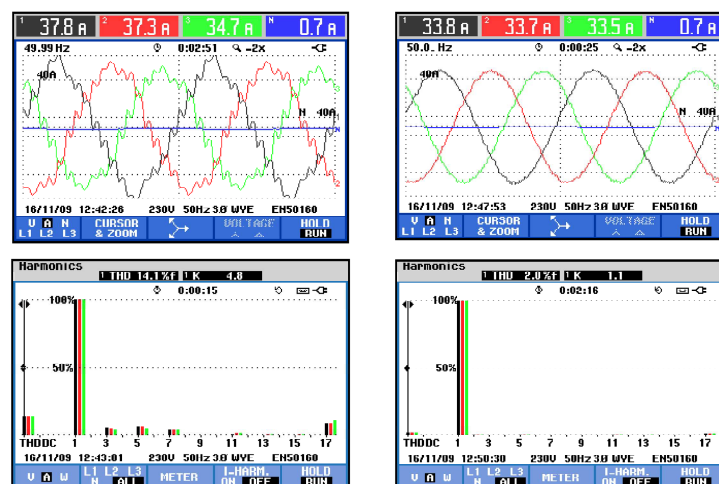
W uzupełnienie rezultatów przedstawionych na Rys.5-7, w tabelicy 1 zestawiono wyniki pomiarów kątów φ_{Sa} , φ_{Sb} , φ_{Sc} przesunięcia fazowego prądów i_{Sa} , i_{Sb} , i_{Sc} względem napięć fazowych v_{Sa} , v_{Sb} , v_{Sc} oraz wartości skutecznych I_{Sa} , I_{Sb} , I_{Sc} tych prądów dla trzech różnych obciążeń: 100%, 125% i 75 % wartości znamionowej oraz przy wyłączonym i włączonym S-APF. Ponadto, przedstawiono również średnie wartości $\cos\varphi_{AV}=(\cos\varphi_a+\cos\varphi_b+\cos\varphi_c)/3$.



Rys. 6. Oscylogramy oraz widma prądów sieci $i_{Sa,b,c}$ w systemie o mocy $S_{REC}=15$ kVA (75% obciążenia znamionowego) z dławikiem $L_d=0,6$ [mH], przed i po włączeniu S-APF.

Te wyniki wskazują na dodatkowe działanie S-APF w zakresie wyrównywania wartości skutecznych oraz kątów przesunięć fazowych prądów sieci. Ponadto, wartości $\cos\varphi_{AV}$ potwierdzają wysokie walory energetyczne rozpatrywanego rozwiązania.

Przedstawione wyniki pomiarów laboratoryjnych, pozwalają stwierdzić, że szeregowy filtr aktywny, znacząco ogranicza wyższe harmoniczne prądu sieciowego przekształtnika 18-pulsowego z CDT&CTR. S-APF jest skuteczny zarówno w przypadku obciążenia znamionowego, jak i w stanach odciążenia i przeciążenia.



Rys. 7. Oscylogramy oraz widma prądów sieci $i_{Sa,b,c}$ w systemie o mocy $S_{REC}=25$ kVA (125% obciążenia znamionowego) z dławikiem $L_d=0,6$ [mH], przed i po włączeniu S-APF.

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

Integracja prostownika z S-APF w badanym systemie zasilania pozwala również na potencjalne uproszczenie struktury przekształtnika - rezygnację z dławika sieciowego L_d , przy jednoczesnym znaczącym obniżeniu negatywnego wpływu na sieć zasilającą.

Wnioski

Aplikacja przekształtnika 18-pulsowego z systemem dławików sprzężonych, współpracującego z S-APF małej mocy, wydaje się być interesującym rozwiązaniem dla problemu czystego przetwarzania energii AC-DC z uwagi na:

- uproszczenie układu przekształtnika związane z możliwością eliminacji dławika sieciowego,
- niewielką moc gabarytową obydwu układów [1], decydującą o ich niewielkich kosztach,
- istotne zmniejszenie zawartości wyższych harmonicznych w przebiegu prądu zasilającego,
- małą wrażliwość na asymetrię zasilania i zmiany obciążenia,
- możliwość konstrukcji nisko kosztowych systemów zasilających o dużej niezawodności.

Korzyści wynikające z zastosowania prezentowanego układu filtra szeregowego, dotyczą skutecznej minimalizacji negatywnego oddziaływania przekształtnika wielopulsowego na sieć zasilającą, w różnorodnych warunkach zasilania. Można przyjąć, że prostownik 18-pulsowy w konfiguracji z szeregowym filtrem aktywnym, stanowiącym razem układ przemiennika pracującego w warunkach zbliżonych do CPC.

Bibliografia

- [1] A. Moreno-Muñoz, "Power Quality Mitigation Technologies in a Distributed Environment", Springer, 2007
- [2] R. Strzelecki, G. Benysek, "Power electronics in smart electrical energy networks", Springer, 2009
- [3] R. Strzelecki, H. Supronowicz, "Filtracja harmonicznych w w sieciach zasilających prądu przemiennego", Wydawnictwo Adam Marszałek, Toruń, 1997/1999 (wyd.1/wyd.2).
- [4] R. Strzelecki, H. Supronowicz, "Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy", Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2000.
- [5] H. Akagi, E.H. Watanabe, M. Aredes, "Instantaneous power theory and applications to power conditioning", John Wiley&Sons, NY, 2007.
- [6] D. A. Paice, "Clean Power Electronic Converters: Engineering Design And Application Guides ", Paice & Associates, Inc., 2004
- [7] B. Singh, et al., "A Review of Three-Phase Improved Power Quality AC-DC Converters", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol.51(3), pp. 641-660, 2004.
- [8] B. Singh, et al., "Multipulse AC-DC Converters for Improving Power Quality: A Review", IEEE Trans. on Power Electronics, vol 23(1), pp. 260 – 281, 2008
- [9] J. Plewako, „Wielopulsowe przekształtniki diodowe zasilane z autotransformatorów”, Przegląd Elektrotechniczny, nr 2, s. 53-56, 2007.
- [10] P. Mysiak, "Multi-pulse diode rectifier with current harmonic blocking reactors", Wyd. AM w Gdyni, 2010
- [11] P. Mysiak, "Eighteen-pulse diode rectifier with three-phase coupled reactors", Archives of Electrical Engineering, vol.L(1), pp. 67-76, 2001.

- [12] H. Fujita, H. Akagi, "An approach to harmonic current-free ac/dc power conversion for large industrial loads: The integration of a series active filter with a double-series diode rectifier," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 33(5), pp. 1233–1240, 1997

Autorzy: prof. dr hab. inż. Ryszard Strzelecki, Akademia Morska w Gdyni, Katedra Automatyki Okrętowej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, rstrzele@am.gdynia.pl, Instytut Elektrotechniki, Zakład Przekształtników Mocy, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa.
dr. hab. inż. Piotr Mysiak, Akademia Morska w Gdyni, Katedra Automatyki Okrętowej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, mysiak@am.gdynia.pl.