

# Predyktyjne sterowanie napięciem wejściowym prądowego przekształtnika AC/DC

**Streszczenie.** Praca dotyczy sieciowego przekształtnika AC/DC pracującego jako źródło prądowe. Referat przedstawia nowy sposób sterowania przekształtnikiem, opierający się na predykcji napięcia wejściowego, który zapewnia jednostkowy współczynnik mocy i minimalizuje zawartość wyższych harmonicznych w prądzie pobieranym z sieci. Zaproponowana metoda opiera się na wyborze wektorów prądu prostownika w zależności od najmniejszej wartości współczynnika jakości. Poprawność działania algorytmu potwierdzają wyniki symulacji w środowisku MATLAB/Simulink.

**Abstract.** The paper presents a new control algorithm for Current Source Rectifier supplied from the grid, based on input voltage prediction. Proposed method corrects power factor and reduces higher harmonics in phase current. The algorithm chooses proper space vector of CSR according to the smallest value of the cost function. Properties of the new method are shown in simulations carried out using MATLAB/Simulink. (**Predictive input voltage control of current AC/DC converter**).

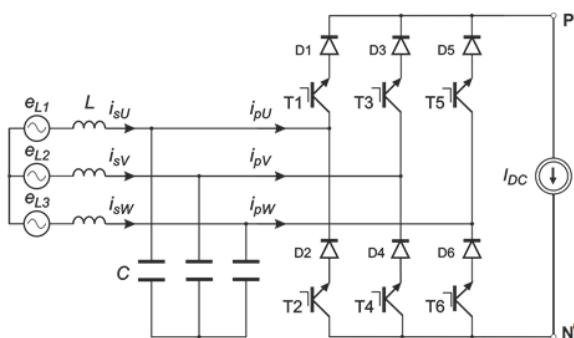
**Słowa kluczowe:** prądowy przekształtnik AC/DC, sterowanie predyktyjne, filtr LC, korekcja współczynnika mocy.

**Keywords:** Current Source Rectifier, Predictive Control, LC filter, Power Factor Correction.

## Wstęp

Przekształtnik AC/DC pracujący jako źródło prądowe zapewnia pobór sinusoidalnego prądu z sieci oraz zwrot energii do sieci i jednostkowy współczynnik mocy. Ponadto, w przeciwieństwie do prostownika pracującego jako źródło napięciowe, wytwarza napięcie stałe niższe od sieciowego. Jest to ważna zaleta, która pozwala na nieużywanie układów obniżających napięcie i bezpośrednie zasilanie odbiorników niskonapięciowych i sterowanie silnikami DC.

Schemat elektryczny przekształtnika jest przedstawiony na rysunku 1. Na wejściu znajduje się filtr LC (gdzie L to indukcyjność sieci), który jest przyczyną oscylacji i zwiększa pobór wyższych harmonicznych prądu. Jest to poważna wada tego układu, gdyż tłumienie harmonicznych jest skomplikowanym, ale niezbędnym zadaniem. Dotychczasowe badania skupiają się na implementacji nowych algorytmów sterowania poprawiających jakość przebiegów lub sprawność i gęstość mocy. Najnowszymi opracowanymi metodami sterowania są: sterowanie liniowe z aktywnym tłumieniem [6] oraz bezpośrednia regulacja mocy z redukcją harmonicznych [8].



Rys.1. Schemat części silnoprądowej przekształtnika

Na początku algorytm predyktyjny został stworzony dla falownika napięcia [9]. Sterowanie predyktyjne dla prostownika o wyjściu prądowym zostało przedstawione w [1] i [2]. Aby zmniejszyć częstotliwość przełączeń rozwinęto algorytm z aktywnym tłumieniem harmonicznych [7]. Inne rozwiązanie opiera się na zmodyfikowanej funkcji kosztów [10]. Ciekawą metodą dla prostownika o wyjściu napięciowym z filtrem LCL przedstawia [5]. Klasyfikację

funkcji kosztów i dostosowywanie współczynników wagowych wyjaśniono w [3].

Niniejsza praca przedstawia nowe podejście do sterowania predyktyjnego. Głównym celem było zapewnienie jednostkowego współczynnika mocy oraz jak najmniejszych odkształceń w prądzie pobieranym z sieci. Dyskretny model predyktyjny układu jest używany do predykcji napięć na kondensatorach dla wszystkich możliwych stanów łączników przekształtnika. Wartości te są podstawiane do funkcji kosztów. Stan łączników w następnym kroku próbkowania wybierany jest na podstawie najmniejszej wartości funkcji kosztów. Prąd obciążenia jest prądem o stałej wartości. Wyniki symulacyjne zawierają rezultaty osiągnięte dla różnych wartości pojemności i indukcyjności filtrujących w stanach statycznych i dynamicznych, co potwierdza poprawne działanie metody.

## Podstawy działania prostownika

Sterowanie tranzystorami polega na jednoczesnym załączaniu tylko dwóch tranzystorów: jednego z grupy „dodatniej” i jednego z grupy „ujemnej”. Istnieje dziewięć możliwych stanów łączników, trzy z nich powodują odcięcie odbiornika od sieci.

Model dyskretny układu powstał na podstawie analizy przeprowadzonej w wirującym z synchroniczną prędkością kątową  $\omega_s$  układzie odniesienia  $dq$  zorientowanym na wektor  $E_{sdq}$ , który leży na osi  $d$ . Transformacja ze współrzędnych trójfazowych do wirującego układu współrzędnych  $dq$  jest opisana poniższym równaniem

$$(1) \quad \mathbf{i}_{pdq} = e^{-j\omega_s t} \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \\ \mathbf{a} & \mathbf{1} & \mathbf{a}^2 \\ \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pU} \\ i_{pV} \\ i_{pW} \end{bmatrix}$$

Wektory prądu prostownika przyjmują wartości

$$(2) \quad \mathbf{i}_{pdq} = \begin{cases} I_{DC} e^{j(n\frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{6} - \omega_s t)} \\ 0 \end{cases}$$

Działanie filtra można opisać przy pomocy równań

$$(3) \quad E_{sdq} = \mathbf{u}_{Cdq} + j\omega_s L \mathbf{i}_{sdq} + L \frac{d\mathbf{i}_{sdq}}{dt}$$

$$(4) \quad \mathbf{i}_{sdq} = \mathbf{i}_{pdq} + j\omega_s C \mathbf{u}_{cdq} + C \frac{d\mathbf{u}_{cdq}}{dt}$$

gdzie:  $\mathbf{E}_{sdq}$  - wektor napięcia sieci,  $\mathbf{u}_{cdq}$  - wektor napięcia kondensatorów,  $\mathbf{i}_{sdq}$  - wektor prądu sieci,  $\mathbf{i}_{pdq}$  - wektor prądu przekształtnika.

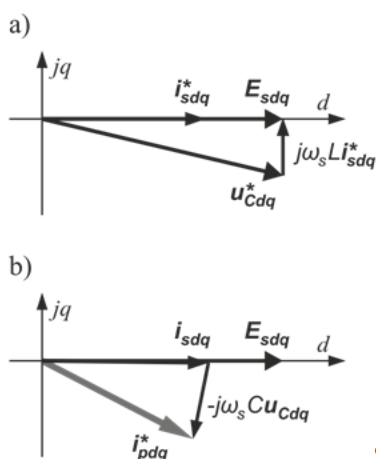
### Sterowanie predykcyjne

Zaproponowana idea sterowania przekształtnika prądowego polega na predykcyjnym kształtowaniu napięcia na wejściowym kondensatorze filtrującym. Zadany wektor napięcia  $\mathbf{u}^*_{cdq}$  pozwala odwzorować sinusoidalne prądy współfazowe z napięciami sieci przy uwzględnieniu parametrów sieci ( $L$ ,  $\mathbf{E}_{sdq}$ ). Aby to osiągnąć zadane wartości składowych  $d$  i  $q$  wektora napięcia są wyznaczone na podstawie założenia, że odtwarzany prąd sieci jest bliski sinusoidalnej wartości zadanej  $\mathbf{i}_{sdq} = \mathbf{i}^*_{sdq}$ . Stosując to przybliżenie zakłada się również, że w stanie ustalonym wektor  $\mathbf{i}_{sdq}$  jest stały, a jego pochodna równa zero. Stąd z równania (3) można wyznaczyć

$$(5) \quad u^*_{Cd} = E_{sd}$$

$$(6) \quad u^*_{Cq} = -\omega_s L i^*_{sd}$$

Wykres wektorowy ilustrujący powyższą sytuację przedstawia rysunek 2a. Jak można zauważyć, poprzez ustawienie odpowiedniego przesunięcia kąтового między wektorem napięcia sieci  $\mathbf{E}_{sdq}$  a wektorem napięcia kondensatorów  $\mathbf{u}^*_{cdq}$  można osiągnąć jednostkowy współczynnik mocy oraz wpływać na prąd pobierany z sieci.



Rys.2. Wykres wektorowy objaśniający zasadę wyznaczania zadanego wektora napięcia  $\mathbf{u}^*_{cdq}$  (a) oraz wektora prądu  $\mathbf{i}^*_{pdq}$  (b)

Predykcja napięcia opiera się na równaniu prądowym filtra (4), z którego można wyznaczyć pochodną wektora napięcia kondensatorów

$$(7) \quad \frac{d\mathbf{u}_{cdq}}{dt} = \frac{1}{C} (\mathbf{i}_{sdq} - \mathbf{i}_{pdq} - j\omega_s C \mathbf{u}_{cdq}).$$

Uwzględniając, że

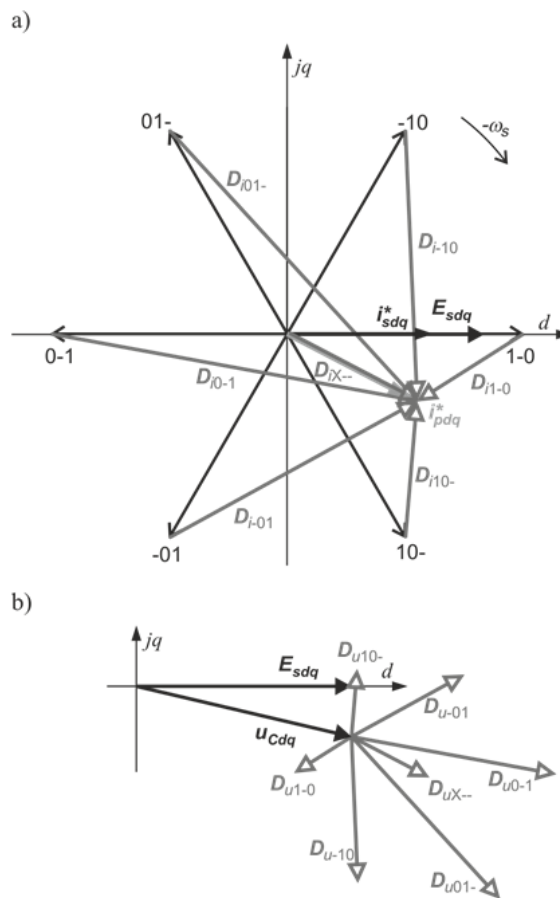
$$(8) \quad \mathbf{i}^*_{pdq} = \mathbf{i}_{sdq} - j\omega_s C \mathbf{u}_{cdq}$$

z równań (7) i (8) możemy wyznaczyć wielkość  $\mathbf{D}_{ixxx}$  proporcjonalną do wektora pochodnej napięcia (9) oraz wielkość  $\mathbf{D}_{uxxx}$  opisującą kierunek i szybkość zmian wektora napięcia (10):

$$(9) \quad C \frac{d\mathbf{u}_{cdq}}{dt} = \mathbf{D}_{ixxx} = \mathbf{i}^*_{pdq} - \mathbf{i}_{pdq}$$

$$(10) \quad \mathbf{D}_{uxxx} = \frac{d\mathbf{u}_{cdq}}{dt} = \frac{1}{C} \mathbf{D}_{ixxx}.$$

Ilustrację graficzną równania (8) przedstawiono na rysunku 2b, równania (9) na rysunku 3a, natomiast równania (10) na rysunku 3b.



Rys.3. Wektory proporcjonalne do wektorów pochodnych napięcia (a) oraz wektory pochodnych napięcia (b)

W każdym okresie próbkowania  $T_s$  wyznaczany jest przewidywany przyrost wartości napięcia, który zależy od długości i kierunku wektora  $\mathbf{D}_{uxxx}$

$$(11) \quad \Delta \mathbf{u}^p_{cdq} = \frac{d}{dt} \mathbf{u}_{cdq} T_s = \Delta u^p_{Cd} + j \Delta u^p_{Cq}.$$

Wartość przewidywanego napięcia wynosi

$$(12) \quad \mathbf{u}^p_{cdq} = \mathbf{u}_{cdq} + \Delta \mathbf{u}^p_{cdq} = \mathbf{u}_{cdq} + \mathbf{D}_{uxxx} T_s.$$

Przewidywane wartości składowych  $d$  i  $q$  napięcia są porównywane do zadanych wartości napięcia

$$(13) \quad \varepsilon_{u_{cd}} = u^*_{Cd} - u^p_{Cd}$$

$$(14) \quad \varepsilon_{u_{cq}} = u^*_{Cq} - u^p_{Cq}$$

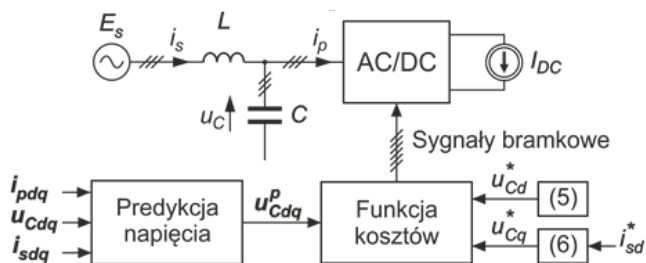
a następnie podstawiane do funkcji kosztów

$$(15) \quad J_k = \sqrt{w_{u_{cd}} \varepsilon_{u_{cd}}^2 + w_{u_{cq}} \varepsilon_{u_{cq}}^2}$$

gdzie  $w_{u_{cd}}$ ,  $w_{u_{cq}}$  to współczynniki wagowe.

Algorytm działa następująco: w okresie każdego próbkowania wyznaczone są przewidywane wartości składowych napięcia kondensatorów dla wszystkich możliwych stanów łączników przekształtnika (12). Na ich podstawie obliczana jest wartość funkcji kosztów  $J_k$  (15). Następnie, załączana jest taka konfiguracja łączników, która odpowiada najmniejszej wartości  $J_k$ .

Pełen schemat układu sterowania jest przedstawiony na rysunku 4.



Rys.4. Schemat układu sterowania

### Wyniki symulacji

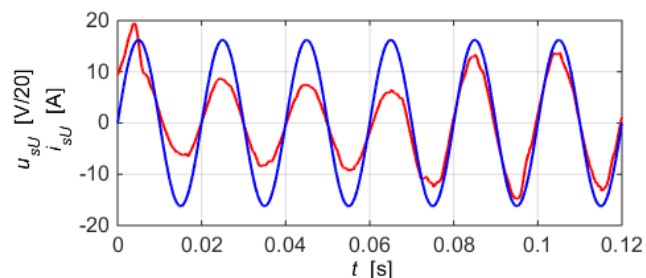
W celu sprawdzenia poprawności działania zaproponowanego algorytmu przeprowadzono symulacje przy pomocy programu MATLAB/Simulink. Okres próbkowania wynosił  $T_s = 50 \mu s$ , a prąd wyjściowy  $I_{DC} = 15 A$ . Wyniki pokazują działanie układu w stanach statycznych i dynamicznych.

Tabela 1. Wartości współczynnika THD dla różnych wartości prądów i filtrów

Parametry filtru		THD [%]	
L [mH]	C [ $\mu F$ ]	$i_{sd}^* = 7 A$	$i_{sd}^* = 11 A$
2,5	80	4,99	4,56
2,5	90	4,01	6,73
3	90	4,83	3,94
3	70	5,84	4,35
2,5	70	6,27	7,24

Symulacje zostały wykonane dla różnych wartości parametrów  $L$  i  $C$ . Porównanie rezultatów działania metody w stanie statycznym pokazuje tabela 1. Zawiera wartości współczynnika THD dla dwóch wybranych wartości zadanych składowej  $d$  prądu sieci. Jak można wywnioskować na podstawie wyników, na odkształcenia prądu największy wpływ miała indukcyjność.

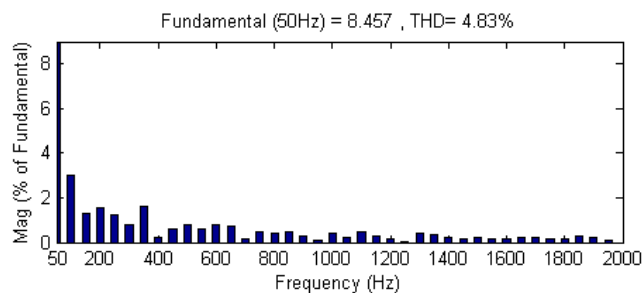
Rysunek 5 przedstawia napięcie i prąd pobierany z sieci dla filtru  $L = 3 mH$  i  $C = 90 \mu F$ , przy czym przez pierwsze 0,065 sekund zadany prąd sieci wynosił  $i_{sd}^* = 7 A$ , a następnie zmienił wartość na  $i_{sd}^* = 11 A$ . Jak można zauważyć w obu przypadkach przesunięcie fazowe jest bliskie zeru.



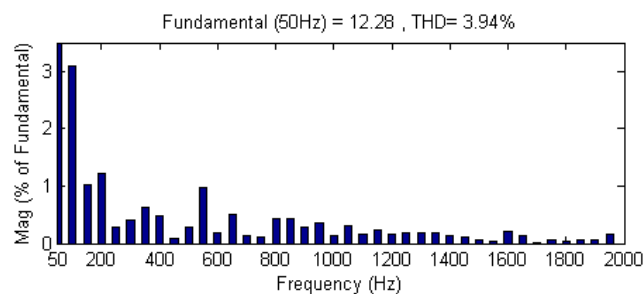
Rys.5. Przebiegi prądu i napięcia sieci w stanie statycznym i dynamicznym dla  $i_{sd}^* = 7 A$  oraz  $i_{sd}^* = 11 A$

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono wyniki analizy harmonicznej prądu sieci dla obydwu wartości prądów zadanych. Największy wpływ mają harmoniczne o

częstotliwości zbliżonej do częstotliwości rezonansowej filtra bądź będącej jej wielokrotnością. Im mniejszy prąd tym wpływ tych odkształceń jest bardziej widoczny.

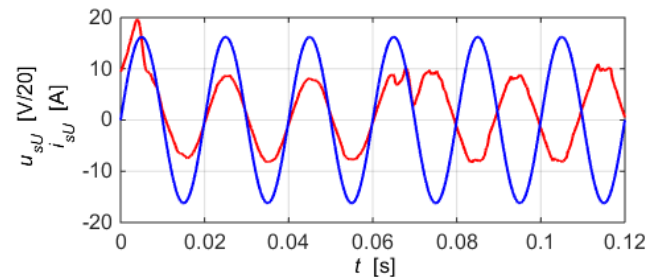


Rys.6. Wyniki analizy harmonicznej dla  $i_{sd}^* = 7 A$



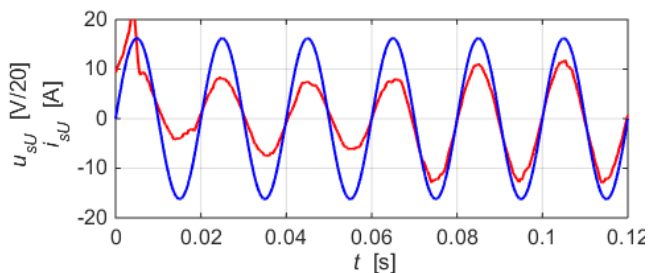
Rys.7. Wyniki analizy harmonicznej dla  $i_{sd}^* = 11 A$

Wykonano również symulacje oddawania energii do sieci. Rysunek 8 przedstawia przebiegi podczas skokowej zmiany prądu zadanego z wartości  $i_{sd}^* = 7 A$  na  $i_{sd}^* = -7 A$  po czasie 0,065 sekund. Jak można zauważyć nowa metoda sterowania działa poprawnie również w tym przypadku, a moc przekazywana do sieci ma charakter czynny. Jediną wadą jest dość długi czas regulacji (około 5 ms), spowodowany wpływem indukcyjności sieci na prąd.



Rys.8. Przebiegi prądu i napięcia sieci w stanie statycznym i dynamicznym dla  $i_{sd}^* = 7 A$  oraz  $i_{sd}^* = -7 A$

Dodatkowo zbadano również działanie algorytmu w przypadku, gdy indukcyjność sieci jest mniejsza od zakładanej o 20%. Rysunek 9 przedstawia napięcie i prąd pobierany z sieci, gdy przez pierwsze 0,065 sekund zadany prąd sieci wynosił  $i_{sd}^* = 5 A$ , a następnie zmienił wartość na  $i_{sd}^* = 8 A$ . Wyniki udowadniają, że metoda działa poprawnie również w takich warunkach. Mniejsza indukcyjność wpłynęła jedynie na gorsze wygładzenie prądu. Z kolei dla indukcyjności większej o 20% od zakładanej prąd jest mniej odkształcony a współczynnik mocy jest nadal równy jedności. Większe odchylenia wartości indukcyjności dają niestety gorsze rezultaty i współczynnik mocy nie jest tak dobrze korygowany. Jest to spowodowane tym, że w tej metodzie wielkością regulowaną nie jest bezpośredni prąd pobierany z sieci, tylko napięcie na kondensatorach.



Rys.9. Przebiegi prądu i napięcia sieci w stanie statycznym i dynamicznym dla  $i_{sd}^* = 5$  A oraz  $i_{sd}^* = 8$  A przy źle oszacowanej indukcyjności sieci

Powyższe wyniki pokazują, że cel został osiągnięty i przy pomocy nowej metody sterowania możliwe jest osiągnięcie stosunkowo niskich odkształceń prądu i jednostkowego współczynnika mocy.

### Podsumowanie

Sterowanie mocą i prądem sieci przy pomocy predykcyjnego sterowania napięciem wejściowym prostownika jest możliwe i osiągalne dla zaproponowanej metody sterowania. Ponadto, dla wszystkich wybranych wartości filtrów i wartości prądu pobieranego z sieci współczynnik mocy jest bliski jedności pod warunkiem dobrania odpowiednich współczynników wagowych. Dodanie predykcji prądu sieci poprzez uwzględnienie składowych prądu w funkcji jakości umożliwi jeszcze dokładniejsze sterowanie, jak również zastosowanie mniejszych wartości pojemności i indukcyjności filtra.

Porównując otrzymane wyniki z rezultatami osiągniętymi w literaturze można zauważyć, że niektóre z opracowanych algorytmów działają dobrze przy dużej pojemności kondensatorów filtrujących. Tak jest w przypadku metody predykcyjnej przedstawionej w [1]. Natomiast metoda predykcyjna przedstawiona w [7] wymaga dużej indukcyjności sieciowej. Pozostałe grupy metod dla osiągnięcia niskiego THD prądu sieci korzystają z algorytmów tłumienia harmoniczných, jak w [6]. Tłumienie harmoniczných wyższych rzędów ma skutek uboczny w postaci zwiększania piątej i siódmej harmoniczných. Aby tego uniknąć trzeba rozbudować sterowanie o dodatkowe sprzężenia zwrotne od tych harmoniczných.

Publikacja sfinansowana z pracy S/WE/3/2013 oraz MB/WE/2/2014.

**Autorzy:** mgr inż. Agata Godlewska, prof. dr hab. inż. Andrzej Sikorski, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Energoelektroniki i Napędów Elektrycznych, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, E-mail: [a.godlewska@doktoranci.pb.edu.pl](mailto:a.godlewska@doktoranci.pb.edu.pl), [a.sikorski@pb.edu.pl](mailto:a.sikorski@pb.edu.pl)

### LITERATURA

- [1] Correa P., Rodriguez J., Lizama I., Andler D., A predictive control scheme for current-source rectifiers, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 56 (2009), n.5, 1813–1815
- [2] Correa P., Rodriguez J., A predictive control scheme for current source rectifiers, Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2008, 13th, 1-3 Sept. 2008, 699-702
- [3] Cortes P., Kouro S., La Rocca B., Vargas R., Rodriguez J., Leon J., Vazquez S., Franquelo L., Guidelines for weighting factors design in model predictive control of power converters and drives, IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Feb. 2009, Gippsland, Australia, 1–7
- [4] Cuzner R., Drews D., Venkataramanan G., Power Density and Efficiency of System Compatible, Sine-Wave Input/Output Drives, IEEE Energy Conversion Conference and Exposition (ECCE), September 2012
- [5] Falkowski P., Predykcyjne algorytmy sterowania przekształtnikiem AC/DC z filtrem LCL, XII Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym "SENE 2015", Łódź 2015
- [6] Liu F., Wu B., Zargari N. R., Pande M., Inductor Current Feedback Control Based Active Damping for High Power PWM Current Source Rectifier, IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), (2011), 475 - 479
- [7] Lizama I., Rodriguez J., Wu B., Correa P., Rivera M., Perez M., Predictive control for current source rectifiers operating at low switching frequency, IEEE International Conference on Power Electronics and Motion Control (IPEMC), May 2009 Wuhan, China, 1630–1633
- [8] Noguchi T., Sano K., Specific Harmonic Power Suppression of Direct-Power-Controlled Current-Source PWM Rectifier, 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), (2007), 1436 - 1441
- [9] Rodriguez J., Pontt J., Silva C. A., Correa P., Lezana P., Cortes P., Ammann U., Predictive current control of a voltage source inverter, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 54 (2007), n.1, 495–503
- [10] Zavala P., Rivera M., Kouro S., Rodriguez J., Wu B., Yaramasu V., Baier C., Muñoz J., Espinoza J., Melin P., Predictive Control of a Current Source Rectifier with Imposed Sinusoidal Input Currents, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 10-13 Nov. 2013, 5842 - 5847