

Jarosław Guziński, Janusz Szewczyk  
Politechnika Gdańska, Gdańsk

## SKŁADOWA ZEROWA PRĄDU W UKŁADZIE ELEKTROWNI WIATROWEJ Z GENERATOREM SYNCHRONICZNYM Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

### ZERO CURRENT COMPONENT IN THE WIND POWER PLANT WITH PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR

**Abstract:** In the rotating electrical machines working with transistorized converters common mode (CM) voltage current appears. The reasons of the CM voltage appearing are inner properties of the transistors control algorithms. When the CM voltage exists the CM current can flow through parasitic capacitance of the electrical machines and converters. Part of that current flows through motor bearing and strongly decreases bearing life.

Example of power electronics drive is wind generator system. In the wind generator system two converters are used: machine inverter and grid inverter. In the presented system the permanent magnet synchronous generator (PMSG) was used. For PMSG efficient control the position of the rotor should be known. In the realized drive to eliminate position sensors the sensorless control method was implemented. During realization of the sensorless control the problem with the measurements of the machine voltage appeared. The measured voltage was strongly disturbed by flow of the common mode current. To solve that problem the path the high impedance for CM path was inserted. Two solutions: zero component choke and three-phase transformer applied between the generator drive system and the electric grid were tested. In the paper the CM voltage theory is presented. The results of the experimental investigations are presented.

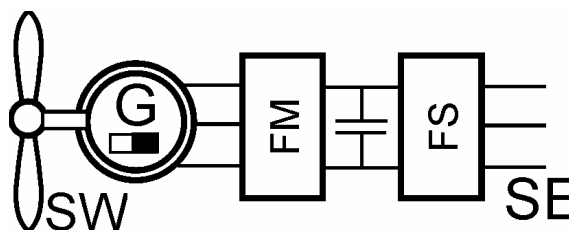
#### 1. Wstęp

W nowoczesnych przekształtnikach energoelektronicznych stosowane są szybkie tranzystory bipolarne z izolowaną bramką (ang. IGBT). Na skutek dużych stromości przełączanych napięć oraz sposobu realizacji algorytmów modulacji pojawia się szereg niekorzystnych zjawisk w układach napędowych [1]. Jednym z głównych niekorzystnych efektów stosowania napędów przekształtnikowych jest pojawienie się składowych zerowych napięcia i prądu w układzie [2]. Składowe te powodują m.in. przepływ prądów łożyskowych oraz pojawienie się napięć wałowych co znacznie przyspiesza zużycie łożysk oraz uniemożliwia stosowanie wyłączników różnicowoprądowych w układach napędowych.

Efekty te można zredukować stosując odpowiednie układy filtrów aktywnych lub pasywnych [3-5] oraz modyfikując algorytmy sterowania tranzystorów w przekształtniku [6].

Problem związany z przekształtnikowymi układami napędowymi jest istotny również w nowoczesnych elektrowniach wiatrowych. Jednym z rodzajów generatorów stosowanych obecnie w elektrowniach wiatrowych są generatory synchroniczne z magnesami trwałymi. Do współpracy generatora z siecią elektroener-

getyczną stosowane są przekształtniki energoelektroniczne – rys. 1.



Rys. 1. Układ elektrowni wiatrowej (SW - silnik wiatrowy, G – generator synchroniczny, FM - falownik maszynowy, FS - falownik sieciowy, SE - sieć elektroenergetyczna)

Generator synchroniczny z magnesami trwałymi wymaga do prawidłowej pracy identyfikacji położenia wirnika. Z uwagi na dążenie do zwiększenia niezawodności układu rezygnuje się coraz częściej z czujników położenia na rzecz odpowiednich metod bezczujnikowych wykorzystujących jedynie pomiary prądów i napięć bezpośrednio w przekształtniku oraz obliczanie równań modelu silnika. Pojawienie się składowej zerowej prądu i napięcia w takim układzie może jednak uniemożliwić stosowanie metod bezczujnikowego sterowania. Zjawisko

to zaobserwowano w realizowanym układzie napędowym elektrowni wiatrowej.

W artykule przedstawiono zaobserwowane problemy związane z realizacją układu bezczujnikowego sterowania generatorem synchronicznym oraz propozycję rozwiązania.

## 2. Generowanie składowej zerowej napięcia w przekształtnikowym układzie napędowym [2, 3, 7]

W napędach przekształtnikowych maszyn prądu przemiennego wykorzystywane są układy o strukturze falownika napięcia – rys. 2.

Napięcie generowane na wyjściu falownika jest cyklem prostokątnych impulsów, które są wynikiem kolejnego przełączania źródła napięcia zasilającego falownik za pomocą cyklicznych przełączeń tranzystorów.

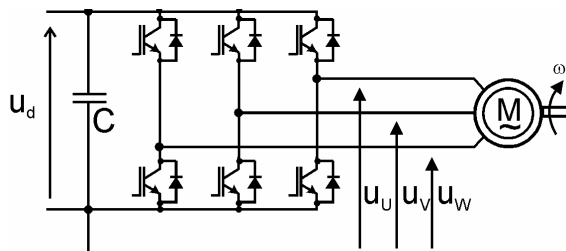
Napięcia wyjściowe falownika można określić względem potencjału bieguna ujemnego baterii kondensatorów. W każdej z faz falownika załączane są naprzemiennie tranzystory co powoduje pojawienie się odpowiedniego chwilowego napięcia na wyjściu falownika.

W trójfazowym falowniku napięcia istnieje osiem możliwych kombinacji załączeń tranzystorów. Kombinacje te wraz z odpowiadającymi im napięciami wyjściowymi przedstawiono w tab. 1.

Napięcia wyjściowe falownika w trójfazowym układzie odniesienia oznaczono jako  $u_U$ ,  $u_V$ ,  $u_W$  natomiast napięcia transformowane do układu współrzędnych prostokątnych jako  $u_\alpha$ ,  $u_\beta$ ,  $u_0$ . Analizując tab. 1 można zauważyć, że w napięciu generowanym przez trójfazowy falownik występuje składowa zerowa napięcia. Wartość składowej zerowej napięcia przy tradycyjnym modulatorze szerokości impulsów osiąga znaczącą wartość. Różnica między maksymalną i minimalną wartością chwilową napięcia składowej zerowej jest równa napięciu w obwodzie pośredniczącym falownika napięcia.

Przykład przebiegu napięcia składowej zerowej w układzie z falownikiem pokazano na rys. 3.

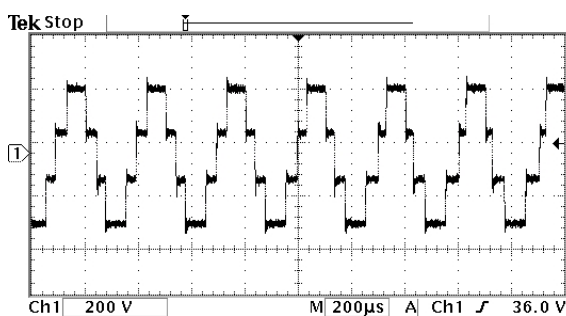
Występowanie składowej zerowej napięcia wyjściowego falownika, przy równoczesnym istnieniu pojemności pasożytniczych powoduje przepływ składowej zerowej prądu w maszynie elektrycznej – rys. 4.



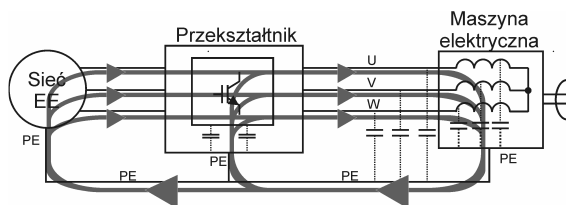
Rys. 2. Falownik napięcia

Tab. 1. Wektory napięć wyjściowych trójfazowego falownika napięcia

	Numer wektora napięcia wyjściowego falownika							
	100	110	010	011	001	101	000	111
$u_U$	$U_d$	$U_d$	0	0	0	$U_d$	0	$U_d$
$u_V$	0	$U_d$	$U_d$	$U_d$	0	0	0	$U_d$
$u_W$	0	0	0	$U_d$	$U_d$	$U_d$	0	$U_d$
$\frac{u_0}{U_d}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$\frac{2}{\sqrt{3}}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$\frac{2}{\sqrt{3}}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$\frac{2}{\sqrt{3}}$	0	$\sqrt{3}$
$\frac{u_\alpha}{U_d}$	$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$	$\frac{1}{\sqrt{6}}$	$-\frac{1}{\sqrt{6}}$	$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$	$-\frac{1}{\sqrt{6}}$	$\frac{1}{\sqrt{6}}$	0	0
$\frac{u_\beta}{U_d}$	0	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	0	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$	0	0



Rys. 3. Przebieg napięcia składowej zerowej w układzie z falownikiem napięcia



Rys. 4. Droga przepływu składowej zerowej prądu w układzie napędowym

### 3. Układ eksperymentalny elektrowni wiatrowej

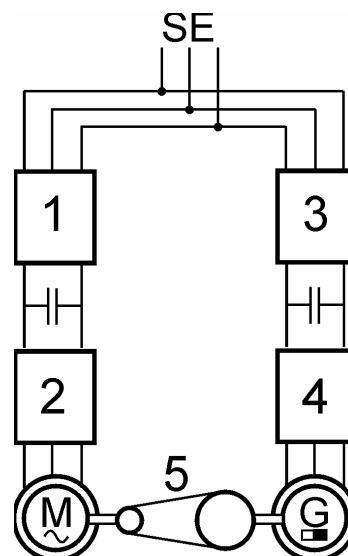
Badany układ elektrowni wiatrowej został wykonany w laboratorium Katedry Automatyki Napędów Politechniki Gdańskiej. W układzie laboratoryjnym funkcję silnika wiatrowego spełniał silnik asynchroniczny klatkowy zasilany z tranzystorowego przemiennika częstotliwości. Silnik klatkowy połączony został przekładnią pasową z generatorem synchronicznym – rys. 5.

Silnik asynchroniczny zasilany był z sieci elektrycznej przez mostek prostowniczy 1 oraz tranzystorowy falownik napięcia 2. Falownik 2 sterowany był zgodnie z metodą  $U/f=\text{const.}$  przy zastosowaniu wektorowej modulacji szerokości impulsów o częstotliwości impulsowania 3.3 kHz.

W układzie elektrowni wiatrowej zastosowano wolnoobrotowy generator synchroniczny z magnesami trwałymi zamontowanymi na powierzchni wirnika. Parametry generatora zestawiono w tab. 2.

Siła elektromotoryczna generatora zmierzona przy otwartych zaciskach generatora ma przebieg przedstawiony na rys. 6.

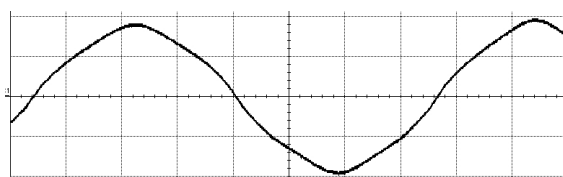
Generator synchroniczny podłączony został do sieci elektroenergetycznej za pomocą tranzystorowych falowników: sieciowego 3 oraz maszynowego 4. Generator sterowany był tak jak maszyna bezszczotkowa prądu stałego – z regulatorem prądu, którego wartość zadana określana była przez nadrzędny blok, w którym wpisano krzywe wiatrowe, tak aby maksymalnie wykorzystać aktualną siłę wiatru. Jako regulatory prądu zastosowano regulatory histerezowe zapewniające przełączanie tranzystorów o zmiennej częstotliwości z minimalnym okresem przełączeń 10  $\mu\text{s}$ . W falowniku sieciowym 3 wykorzystano wektorową modulację szerokości impulsów o częstotliwości przełączeń tranzystorów 10 kHz. Nadrzędnym regulatorem falownika sieciowego był regulator napięcia stałego w obwodzie pośredniczącym przekształtnika. Nadrzędny regulator napięcia FS zadawał moc czynną  $P_z$  przekazywaną do SE. Dodatkowo istniała możliwość zadania mocy biernej  $Q_z$  wytwarzanej w elektrowni wiatrowej. Na podstawie  $P_z$  oraz  $Q_z$  dokonywano w układzie sterowania FS obliczenia zadanego prądu wyjściowego układu elektrowni wiatrowej. Falownik sieciowy został podłączony do SE za pośrednictwem filtra sinusoidalnego.



Rys. 5. Układ laboratoryjny elektrowni wiatrowej (M - silnik klatkowy, G - generator synchroniczny, SE - sieć elektroenergetyczna, 1 - prostownik diodowy, 2, 4 - falowniki maszynowe, 3 - falownik sieciowy, 5 - przekładnia z pasami klinowymi)

Tab. 2. Parametry generatora synchronicznego elektrowni wiatrowej typu PMBg 200L-24B

Parametr	Wartość
Prędkość obrotowa	$n_N=250$ obr/min
Częstotliwość	$f_N=50$ Hz
Moc pozorna	$S_N=8,5$ kVA
Napięcie	$U_N=400$ V (poł. Y)
Prąd	$I_N=12,3$ A
Sprawność	$\eta_N=87,7$ %
Współczynnik mocy	$\cos \varphi_N=1$



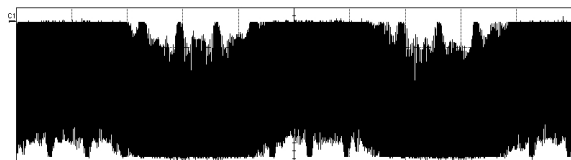
Rys. 6. Przebieg SEM międzyfazowej generatora synchronicznego (100 V/dz, 10 ms/dz)

### 4. Problemy pracy elektrowni wiatrowej

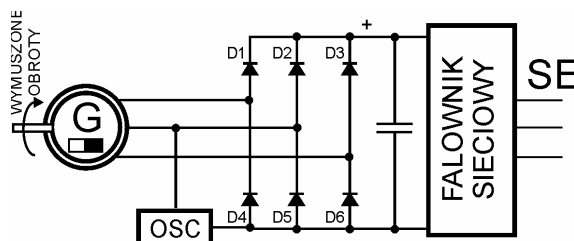
Sterowanie generatora synchronicznego z magnesami trwałymi wymaga przełączania tranzystorów przekształtnika w zależności od położenia wirnika. Przy takiej metodzie sterowania wykorzystywane np. są trzy czujniki hallotronowe umieszczone w szczeliny powietrznej silnika. W niniejszym układzie generator synchroniczny nie został wyposażony w takie czujniki. Wynika to z tego, że w rzeczywistym

układzie elektrowni wiatrowej generator umieszczany jest wraz ze śmigłem na szczycie masztu, natomiast przekształtniki umieszczane są na dole masztu. Konieczność prowadzenia długich przewodów od czujników hallotronowych do falownika zwiększa podatność układu na zakłócenia oraz obniża jego niezawodność z uwagi na możliwość przzerwania połączeń.

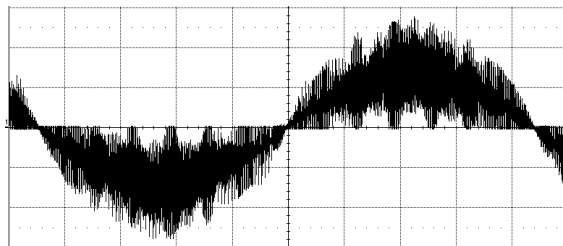
Przy typowym, dla układu z maszyną BLDC, sterowaniu załączane są tranzystory jedynie w dwóch fazach falownika. Trzecia faza silnika nie jest podłączona do źródła zasilania. Napięcie na wyjściu niepodłączonej fazy silnika jest sumą siły elektromotorycznej zaindukowanej w maszynie oraz napięć zasilających pozostałe dwie fazy maszyny. Znając wartość napięcia w niepodłączonej fazie maszyny oraz wartości napięć wygenerowanych na wyjściu pozostałych dwóch faz falownika można obliczyć wartość aktualnej SEM maszyny. Na podstawie znajomości SEM można zidentyfikować położenie wirnika i odpowiednio dokonywać przełączeń tranzystorów. W realizowanym układzie napotkano trudności uniemożliwiające początkowo zrealizowanie takiego sterowania bezczujnikowego. Trudność polegała na tym, że napięcia generowane przez prądnicę i mierzone przez system mikroprocesorowy przy jednoczesnej pracy falownika sieciowego były silnie odkształcone wyższymi harmonicznymi – rys. 7. Przebieg przedstawiony na rys. 7 został zarejestrowany w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 8. Odpowiadający takiemu stanowi pracy przebieg napięcia międzyfazowego generatora przedstawiono na rys. 9. Praca falownika sieciowego spowodowała znaczne zakłócenie napięcia wyjściowego generatora w stosunku do napięcia zmierzonego bez załączenia falownika sieciowego przedstawionego na rys. 6. Po rozciągnięciu skali czasu dla przebiegu z rys. 7 można zauważyć występowanie dominującej harmonicznnej napięcia o częstotliwości 20kHz – rys. 10.



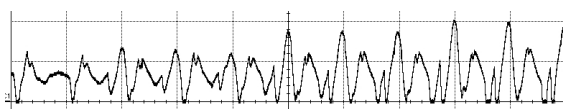
Rys. 7. Przebieg napięcia na wyjściu jednej z faz generatora względem minusa obwodu pośredniczącego przekształtnika przy pracy jedynie falownika sieciowego (200 V/dz, 10 ms/dz)



Rys. 8. Układ pomiarowy napięcia z rysunku 5 (OSC – oscyloskop cyfrowy)



Rys. 9. Przebieg napięcia międzyfazowego generatora przy pracy falownika sieciowego (200 V/dz, 5 ms/dz)



Rys. 10. Przebieg fragmentu napięcia międzyfazowego generatora przy pracy falownika sieciowego (200 V/dz, 100 μs/dz)

Częstotliwość harmonicznnej napięcia 20 kHz odpowiada dwukrotnej częstotliwości przełączeń tranzystorów w falowniku sieciowym i jest cechą charakterystyczną wektorowego modulatora szerokości impulsów.

Zakłócenie przebiegu napięcia wyjściowego generatora uniemożliwiało działanie układu sterowania falownika maszynowego. Układ mógł pracować jedynie z mostkiem prostowniczym diodowym.

Źródłem składowej zerowej napięcia w układzie elektrowni jest falownik sieciowy. Drogę dla składowej zerowej prądu w tym układzie stanowią przewody zasilające układ, przewód ochronny PE oraz pojemności pasozytne. Z uwagi na to, że maszyna synchroniczna wykonana została z magnesami umocowanymi na powierzchni wirnika to charakteryzuje się ona dużą szczeliną powietrzną. Duża szczelina powietrzna maszyny to równocześnie mała indukcyjność uzwojeń fazowych generatora, które stanowią element ograniczający przepływ

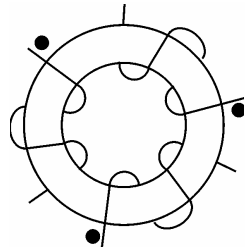
prądu składowej zerowej. Indukcyjność zastępcza uzwojeń stojana dla składowej zerowej prądu określana jest następująco:

$$L_{s0} = \frac{1}{3}(L_U + L_V + L_W) \quad (1)$$

gdzie:  $L_U, L_V, L_W$ , - indukcyjności stojana.

### 5. Rozwiązanie problemu

Zmniejszenie składowej zerowej prądu i napięcia w układzie jest możliwe przez zwiększenie impedancji obwodu dla tych składowych. Jednym z możliwych rozwiązań jest zastosowanie dławika składowej zerowej o strukturze przedstawionej na rys. 11.



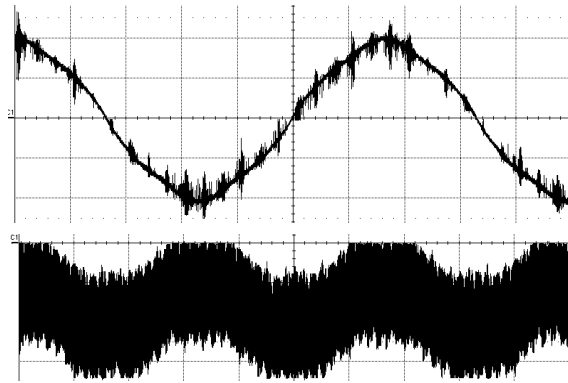
Rys. 11. Dławik obwodu składowej zerowej

Impedancja dławika składowej zerowej jest pomijalna w symetrycznym układzie trójfazowym. W układzie symetrycznym wypadkowy strumień magnetyczny w rdzeniu jest równy zero.

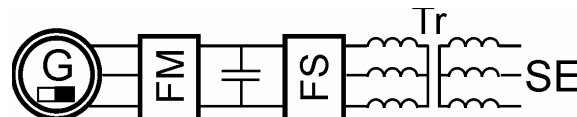
W badanym układzie, w obwód między falownikiem sieciowym i siecią elektroenergetyczną, włączono dwa szeregowo połączone dławiki składowej zerowej o indukcyjnościach 14mH każdy. Przebiegi napięć zarejestrowanych w takim układzie przedstawiono na rys. 12.

Zastosowanie dławików składowej zerowej nie rozwiązało problemu. W przebiegu napięcia międzyfazowego składowa zmienna została znacząco ograniczona. Jednak w napięciu mierzonym, przez układ pomiarowy systemu mikroprocesorowego, względem minusa obwodu DC, jej wartość jest nadal znaczna. Mierzone napięcie nie umożliwiała realizacji przyjętej metody sterowania generatorem.

Realizacja działania układu pełnego sterowania generatorem stała się możliwa dopiero po włączeniu od strony sieci elektroenergetycznej transformatora trójfazowego – rys. 13.

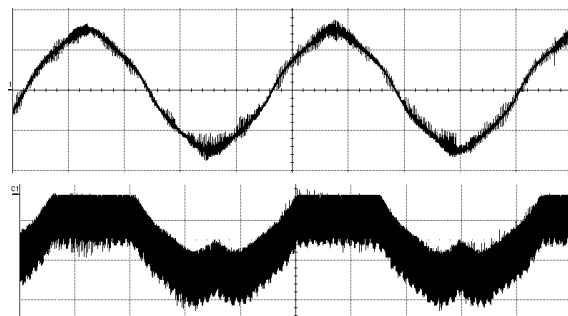


Rys. 12. Przebieg napięcia międzyfazowego generatora (górny) oraz napięcia fazowego względem minusa obwodu pośredniczącego (dolny) przy załączonym jedynie falowniku sieciowym w układzie z dławikami składowej zerowej (200 V/dz, 20 ms/dz)



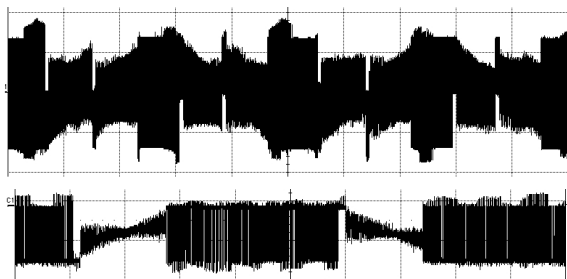
Rys. 13. Układ elektrowni wiatrowej z transformatorem Tr

Dla układu z transformatorem zarejestrowano przebiegi napięć przedstawione na rysunku 14. Z zasady działania transformatora wynika, że nie przenosi on składowej zerowej prądu, jednak podobnie jak w przypadku maszyny elektrycznej w transformatorze występują pojemności pasożytnicze, które umożliwiają przepływ prądu składowej zerowej. Napięcie uzyskane w obwodzie z transformatorem umożliwiło jednak realizację przyjętej metody sterowania generatora synchronicznego.



Rys. 14. Przebieg napięcia międzyfazowego generatora (górny) oraz napięcia fazowego względem minusa obwodu pośredniczącego (dolny) przy załączonym jedynie falowniku sieciowym w układzie z transformatorem (200 V/dz, 10 ms/dz)

Przebieg napięcia wyjściowego generatora zarejestrowany w pełni działającym układzie elektrowni wiatrowej przedstawiono na rysunku 15.



Rys. 15. Przebieg napięcia międzyfazowego generatora (górny - 200 V/dz, 10 ms/dz) oraz napięcia fazowego względem minusa obwodu pośredniczącego (dolny - 500 V/dz, 5 ms/dz) przy pracy falownika sieciowego i maszynowego w układzie z transformatorem

Przebieg napięcia z rys. 15 składa się z przebiegów SEM generatora oraz napięcia generowanego w układzie falownika maszynowego. Kształt tego napięcia jest charakterystyczny dla przyjętej metody sterowania generatora BLDC i świadczy o prawidłowym działaniu układu.

## 6. Wnioski

Zastosowanie przekształtników energoelektronicznych w układzie napędowym elektrowni wiatrowej z generatorem synchronicznym powodowało przepływ znaczącego prądu składowej zerowej. Uniemożliwiało to realizację sterowania pracy maszyny bez stosowania czujników położenia wirnika. Zastosowanie dławika składowej zerowej ograniczyło wartość napięcia składowej zerowej jednak dopiero włączenie transformatora od strony sieci zasilającej, jako obiektu o dużej impedancji dla składowej zerowej, umożliwiło realizację przyjętej metody sterowania generatorem synchronicznym.

## 7. Literatura

- [1]. Muetze A., Binder A.: *High frequency stator ground currents of inverter-fed squirrel-cage induction motors up to 500 kW*. EPE, Tuluza, Francja, 2003.
- [2]. Krzemiński Z., Bogalecka E.: *Generowanie składowej zerowej w trójfazowym falowniku napięcia*. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 2, 2000.
- [3]. Krzemiński Z.: *Zastosowanie filtrów składowej zerowej do ograniczania napięć i prądów współbieżnych*. Projektowanie, budowa, eksploatacja instalacji i urządzeń elektroenergetycznych oraz certy-

fikacja wyrobów. Gdańskie Dni Elektryki 2004, 17-18.11.2004, 85 lat SEP, Oddz. Gdański SEP Gdańsk: 2004.

[4]. Guziński J., Krzemiński Z.: *Filtr wyjściowy falownika napięcia*. Miesięcznik techniczno - informacyjny Napędy i Sterowanie. Nr 4 (75) - Kwiecień 2005.

[5]. Guziński J.: *Filtr wyjściowy falownika napięcia*. 5 Krajowa Konferencja Postępy w Elektrotechnice Stosowanej PES-5. 20-24 czerwca 2005, Kościelisko.

[6]. Zitselsberger J., Hofmann W.: *Reduction of Bearing Currents by using Asymmetric, Space-Vector-Based Switching Patterns*. Konferencja EPE, Tuluza, Francja, 2003.

[7]. Nowacki Z.: *Modulacja szerokości impulsów w napędach przekształtnikowych prądu przemiennego*. PWN, Warszawa, 1991.

## Autorzy

Dr inż. Jarosław Guziński<sup>(1)</sup>

Mgr inż. Janusz Szewczyk<sup>(2)</sup>

Politechnika Gdańska

Wydział Elektrotechniki i Automatyki

Katedra Automatyki Napędu Elektrycznego

Ul. Narutowicza 11/12; 80-952 Gdańsk

<sup>(1)</sup> tel.: +58 347-29-60, fax +58 341-08-80

email: j.guzinski@ely.pg.gda.pl

<sup>(2)</sup> fax +58 341-08-80

email: j.szewczyk@mmb-drives.com.pl