

## Analiza i badanie właściwości wielofazowego przekształtnikowego systemu przetwarzania energii w stanie awaryjnym

**Streszczenie.** Przedstawiony artykuł opisuje możliwość pracy wielofazowego, przekształtnikowego systemu przetwarzania energii, w przypadku utraty jednej z faz maszyny. System taki, w przeciwieństwie do swoich 3-fazowych odpowiedników, może pracować bez jakiegokolwiek modyfikacji algorytmu sterowania, jednak skutkuje to tętnieniami momentu maszyny wielofazowej. Przedstawione w artykule wyniki symulacyjne oraz eksperymentalne pokazują możliwość pracy w trybie awaryjnym redukującym pulsacje momentu dzięki odpowiedniej modyfikacji prądów fazowych.

**Abstract.** This paper presents an operation of a fault-tolerant algorithm for multiphase energy conversion system during machine's open-phase fault. These systems, unlike their 3-phase counterparts, are able to work in faulted condition without any modification in control algorithm. However, this approach results in additional torque ripples of multiphase machine what should be avoided. An analytical approach of torque ripple reduction algorithm are verified by simulation and experimental investigation. (**Fault-tolerant operation of Multiphase Energy Conversion Systems**).

**Słowa kluczowe:** maszyny wielofazowe, praca w trybie awaryjnym, wektorowe metody sterowania, odnawialne źródła energii.

**Keywords:** multiphase machine, fault-tolerant operation, vector control, renewable energy sources.

### Wstęp

Trójfazowe maszyny indukcyjne są bez wątpienia najpopularniejszymi urządzeniami stosowanymi w przemyśle. Służą one głównie do przetwarzania energii elektrycznej na mechaniczną co wynika przede wszystkim z ich nieskomplikowanej konstrukcji, braku potrzeby konserwacji, a także za sprawą dobrze znanych i opanowanych metod sterowania, które umożliwiają odprężenie momentu od strumienia na wzór maszyn prądu stałego. To ostatnie było możliwe dzięki dynamicznemu rozwojowi technologii wytwarzania elementów półprzewodnikowych dużej mocy, a także polepszeniu osiągnięć produkowanych układów mikroprocesorowych pozwalających wykonywać skomplikowane obliczenia w czasie rzeczywistym. Wspomniane czynniki przyczyniły się również do tego, że maszyny te, najczęściej podłączone do odpowiedniego przemiennika częstotliwości, coraz częściej stosuje się również w aplikacjach generujących energię elektryczną takich jak elektrownie wiatrowe [1] lub stopniowo pojawiające się elektrownie przetwarzające energię prądów morskich lub rzecznych [2].

Niestety, takie rozwiązania podatne są na różnego rodzaju awarie, począwszy od uszkodzenia jednego z łączników półprzewodnikowych, a kończąc na mechanicznym lub termicznym uszkodzeniu uzwojenia fazy maszyny. Te oraz inne wymienione w [3] awarie często skutkują koniecznością wyłączenia danego urządzenia, co z kolei wpływa na przerwę w dostawie energii, a co za tym idzie, redukcję potencjalnego zysku oraz wydłużenie czasu zwrotu inwestycji. Ma to szczególne znaczenie dla elektrowni wiatrowych umieszczonych na morzach gdzie koszty utrzymania takich instalacji są wysokie. Autorzy niektórych publikacji [4], próbują oszacować te koszty, jednak olbrzymia ilość parametrów które należy uwzględnić (np. takie jak: wpływ pogody, wysokość fali, nierównomierny wiek poszczególnych jednostek na danej farmie wiatrowej, a także różnorodność awarii) skutkuje tym, że nawet niewielkie zmiany warunków początkowych powodują różnicę wyniku nawet  $\pm 50\%$ . Jeszcze większą uwagę, w kwestiach utrzymania poprawnej pracy urządzeń, zwrócić należy w aplikacjach pozyskujących energię z pływów wodnych szczególnie jeśli ulokowane są bezpośrednio na dnie morza lub rzeki [5], gdzie z kolei, dostęp do systemu, w celach serwisowych, jest praktycznie niemożliwy.

Wspomniane wcześniej typy awarii można zakwalifikować jako utratę fazy, co w przypadku, trójfazowej maszyny indukcyjnej skutkuje znacznym pogorszeniem pracy oraz koniecznością wyłączenia takiego układu. Możliwe są co prawda rozwiązania pozwalające na pracę przy sprawnych dwóch fazach maszyny, jednak wymagają one dodatkowego przewodu łączącego środek obwodu napięcia stałego z punktem neutralnym maszyny oraz zmiany algorytmu sterowania [6]. Ponadto, moc takiego układu ulega istotnej redukcji. Innym sposobem, może być zastosowanie redundantnej maszyny lub całego układu przekształtnik-maszyna, tak jak pokazano w [7], a która zostaje załączona w przypadku awarii pierwszej. To rozwiązanie jest jednak zdecydowanie droższe oraz okupione jest koniecznością zarezerwowania dodatkowego miejsca, co nie zawsze jest możliwe.

Dlatego też alternatywą, dla zwiększenia niezawodności proponowanych aplikacji, wydaje się zastosowanie maszyny wielofazowej w miejsce trójfazowego generatora. Urządzenie takie charakteryzuje się szeregiem zalet wspomnianych m.in. [8]. Takie rozwiązanie przede wszystkim umożliwia nieprzerwaną pracę w przypadku utraty jednej lub kilku faz - w zależności od liczby uzwojeń maszyny. Warto nadmienić, że taka maszyna może pracować w czasie awarii bez żadnych modyfikacji w algorytmie sterowania, jednakże opracowanie odpowiednich zmian jest zalecane, głównie ze względu na konieczność redukcji pojawiających się tętnień momentu. Ponadto, zwiększona ilość faz (przy tej samej mocy co dla 3-fazowego odpowiednika) pozwala na zmniejszenie prądów przypadających na pojedyncze uzwojenie, a przez to zastosowania łączników półprzewodnikowych na niższe wartości. Ta ostatnia cecha była jedną z przyczyn dla których maszyny wielofazowe były stosowane dla aplikacji wymagających dużych mocy, we wczesnych latach rozwoju dziedziny, kiedy to znamionowy prąd elementów energoelektronicznych był istotnym ograniczeniem.

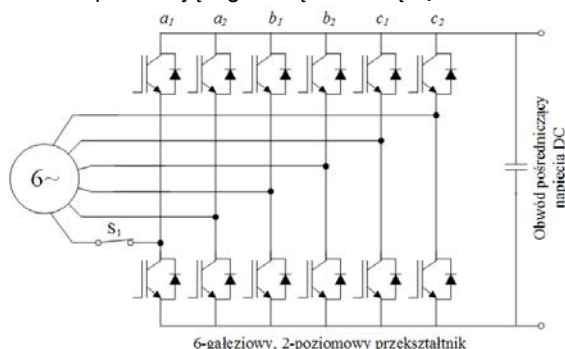
Poniższy artykuł prezentuje możliwość pracy maszyny wielofazowej w przypadku utraty jednej fazy. W szczególności został poruszony problem redukcji tętnień momentu elektromagnetycznego w tak uszkodzonym systemie. Dokonano tego poprzez odpowiednią modyfikację zadaných prądów maszyny wielofazowej. Algorytm został opracowany dla 6-fazowej, symetrycznej maszyny indukcyjnej zasilanej z 6-gałęziowego, 2-poziomowego przemiennika

częstotliwości z algorytmem sterowania zorientowanym połowo. Układ ten jest częścią wielofazowego systemu wytwarzania energii zaprezentowanego w [9]. Przedstawiony problem, jak i jego rozwiązanie zostały zweryfikowane symulacyjnie oraz eksperymentalnie.

### System

Dzięki zastosowaniu falowników do sterowania maszyn elektrycznych możliwe jest sterowanie silnikami o dowolnej liczbie faz. Warto nadmienić, że praktycznie każda maszyna trójfazowa, czy to z magnesami trwałymi, reluktancyjna czy też indukcyjna, mogą mieć swój wielofazowy odpowiednik [10]. W niniejszej pracy została wybrana maszyna 6 fazowa, o symetrycznym rozkładzie uzwojeń. Wszystkie uzwojenia natomiast połączone są w gwiazdę o wspólnym punkcie neutralnym. Uzwojenia maszyny można traktować jako dwa uzwojenia trójfazowe  $a_1b_1c_1$  oraz  $a_2b_2c_2$  przesunięte względem siebie o  $60^\circ$ . Mimo, że ze względów historycznych zdecydowanie popularniejsza jest maszyna o uzwojeniu asymetrycznym [11] (przesunięcie uzwojeń o  $30^\circ$ ), to decyzja odnośnie wyboru została podyktowana prostotą i ceną przewinięcia typowej maszyny 3-fazowej. Dodatkowo, dzięki temu wyborowi, w praktyce znacznie upraszcza się struktura sterowania dla normalnej pracy układu.

Wybrana maszyna może być zasilona z 2-poziomowego przemiennika częstotliwości tak jak przedstawiono to na rysunku 1, gdzie dodatkowo można zauważyć obecność łącznika  $S_1$  pozwalającego odłączać fazę  $a_1$ .



Rys.1. 6-fazowa maszyna indukcyjna zasilana z 2-poziomowego, 6-gaźziowego przekształtnika.

### Sterowanie

Ze względu na znacznie większą (niż przypadku 3-fazowym) ilość zmiennych w maszynie, stosowanie odpowiedniej transformacji zmiennych jest niezbędne dla uproszczenia analizy. Podobnie jak w przypadku trójfazowym dokonywana jest transformacja wielkości fazowych do stacjonarnego układu odniesienia (1).

$$(1) \quad \begin{bmatrix} g_\alpha \\ g_\beta \\ g_{y1} \\ g_{x1} \\ g_{x2} \\ g_{y2} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_6 \cdot \begin{bmatrix} g_{a1} \\ g_{a2} \\ g_{b1} \\ g_{b2} \\ g_{c1} \\ g_{c2} \end{bmatrix}$$

gdzie:  $g$  – oznacza dowolną zmienną taką jak np.: napięcie, prąd, lub strumień skojarzony. Indeksy  $\alpha, \beta, x_1, y_1, x_2, y_2$  oznaczają nowe zmienne w stacjonarnym układzie współrzędnych otrzymane z wartości fazowych  $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2$ . Macierz  $\mathbf{T}_6$  (2) jest tak zwaną macierzą odsprężającą, często też w literaturze spotykaną pod nazwą *Concordia Transform*. Jest ona rozszerzoną macierzą Clarke pozwalającą po przekształceniu na zachowanie stałej wartości mocy. Przyjęta forma pozwala

na stosowanie transformacji odwrotnej tylko poprzez transpozycję tej macierzy. Ponadto, istotną właściwością transformacji (2) jest takie przekształcenie zmiennych, że tylko składowe  $\alpha, \beta$  prądów stojana i wirnika generują moment elektromagnetyczny w maszynie. Dzięki temu większość algorytmów stosowanych dla silników 3-fazowych znajduje swoje bezpośrednie zastosowanie.

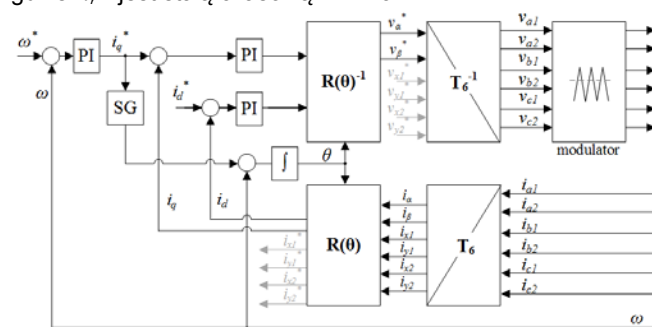
$$(2) \quad \mathbf{T}_6 = \sqrt{\frac{2}{6}} \begin{bmatrix} 1 & \cos \gamma & \cos 2\gamma & \cos 3\gamma & \cos 4\gamma & \cos 5\gamma \\ 0 & \sin \gamma & \sin 2\gamma & \sin 3\gamma & \sin 4\gamma & \sin 5\gamma \\ 1 & \cos 2\gamma & \cos 4\gamma & \cos 6\gamma & \cos 8\gamma & \cos 10\gamma \\ 0 & \sin 2\gamma & \sin 4\gamma & \sin 6\gamma & \sin 8\gamma & \sin 10\gamma \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

gdzie:  $\gamma$  – kąt pomiędzy dwoma sąsiednimi fazami (w tym przypadku  $60^\circ$ )

Z faktu stosowania macierzy odsprężającej  $\mathbf{T}_6$  wynika, że podczas przejścia do układu współrzędnych, wirującego zgodnie ze strumieniem wirnika, można zostać zrealizowane przez transformację  $\mathbf{R}(\theta)$  będącą identyczną jak dla przypadku 3-fazowego. Orientacja sterowania względem wspomnianego strumienia pozwala na odsprężenie momentu elektromagnetycznego (wartość proporcjonalna do prądu  $i_q$ ) od składowej  $i_d$  będącej odpowiedzialną za wytwarzanie strumienia wirnika. Dla większości przypadków w zakresie prędkości od zera do znamionowej, wartość zadana  $i_d^*$  jest stała, podczas gdy wartość zadana prądu  $i_q^*$  jest wyjściem regulatora prędkości. Różnice pomiędzy wartościami zadanymi, a zmierzonymi podawane są na regulatory PI, a ich wyjścia po transformacjach odwrotnych  $\mathbf{R}(\theta)^{-1}$  oraz  $\mathbf{T}_6^{-1}$  (składowe  $x_1, y_1, x_2, y_2$  równe są zero) podawane są na modulator, a następnie na bramki tranzystorów przekształtnika 2-poziomowego. W tym miejscu warto nadmienić, że prosta modulacja SVM dla maszyny 6-fazowej, pokazująca zwiększony stopień skomplikowania niż dla 3-fazowego odpowiednika, została pokazana w [9]. Jednakże, ze względu na możliwość wykorzystania tylko wyższych harmonicznych dla przypadku 6-fazowej maszyny, maksymalny zysk ze stosowania metody SVM nie przekracza 5% jeśli chodzi o wykorzystanie napięcia w obwodzie DC. Dlatego też zastosowano modulację PWM z sygnałem nośnym. Kąt  $\theta$  (strumienia wirnika), niezbędny do odpowiedniej synchronizacji, wyznaczany jest na podstawie całki z sumy prędkości zmierzonej  $\omega$  oraz prędkości poślizgu wyliczanego na zasadzie sprzężenia 'w przód' wykorzystując sygnały zadane prądów osi  $d$  oraz  $q$  wg zależności (3)

$$(3) \quad SG = \frac{i_q^*}{\tau_r i_d^*}$$

gdzie:  $\tau_r$  – jest stałą czasową wirnika.



Rys.2. Sterowanie zorientowane połowo względem strumienia wirnika dla 6-fazowej maszyny indukcyjnej.

## Praca w przypadku awarii

Przedstawiony w poprzedniej sekcji algorytm umożliwia nieprzerwaną pracę maszyny nawet w przypadku przerwy w jednej z faz, bez konieczności jakiegokolwiek modyfikacji. Jednakże odkształcona trajektoria wektora strumienia maszyny generuje tętnienia momentu elektromagnetycznego tak jak to pokazano w [12],[13]. Stan ten jest niekorzystny zarówno dla łożysk samej maszyny jak i elementów zamontowanych na jej wale. Ponadto, niesymetryczne wartości prądów mogą przekraczać wartości znamionowe uzwojeń co może znacząco wpływać na żywotność m.in. izolacji.

Aby przeanalizować to zjawisko można wykorzystać równania (1),(2) stosując je dla prądów fazowych stojana oraz zakładając, że awaria utraty fazy następuje dla uzwojenia  $a_1$ . Wyznaczając wartości prądów można zaobserwować, że składowe prądów  $i_\beta$  oraz  $i_{y1}$  nie uległy zmianie wskutek awarii. Dlatego też układ opisujący prądy po transformacji można przedstawić w postaci (4).

$$i_\alpha = \sqrt{\frac{2}{6}} (\cos \gamma i_{a2} + \cos 2\gamma i_{b1} + \cos 3\gamma i_{b2} + \cos 4\gamma i_{c1} + \cos 5\gamma i_{c2})$$

$$(4) \quad i_{x1} = \sqrt{\frac{2}{6}} (\cos 2\gamma i_{a2} + \cos 4\gamma i_{b1} + \cos 6\gamma i_{b2} + \cos 8\gamma i_{c1} + \cos 10\gamma i_{c2})$$

$$i_{x2} = \frac{1}{\sqrt{6}} (i_{a2} + i_{b1} + i_{b2} + i_{c1} + i_{c2}) \Rightarrow i_{x2} = 0$$

$$i_{y2} = \frac{1}{\sqrt{6}} (-i_{a2} + i_{b1} - i_{b2} + i_{c1} - i_{c2})$$

Ponadto można zauważyć, że wartość prądu  $i_{x2}$  jest sumą prądów płynących pozostałych fazach dlatego też (ze względu na wspólny punkt neutralny) wynosi ona zero. Z równania (4) wynika, że prądy  $i_{x1}$  oraz  $i_{y2}$ , dotychczas równe zero, wskutek awarii zaczynają płynąć, przez co generowane są dodatkowe straty. Ponadto, odkształcona zostaje wartość prądu  $i_\alpha$  przez co właśnie deformowana jest trajektoria wektora strumienia magnetycznego, czemu towarzyszy pojawienie się tętnień momentu.

W celu utrzymania kołowej trajektorii strumienia, należy przede wszystkim utrzymać zadaną wcześniej wartość składowej  $i_\alpha$ . Istnieje jednak możliwość takiego sterowania w trybie awaryjnym, aby przy kołowej trajektorii strumienia maszyny tak zmienić wartości pozostałych, nieuszkodzonych faz maszyny, aby otrzymać pożądane kryteria takie jak np. minimalizacja strat w miedzi, maksymalizacja momentu itp., jak to przedstawiono m.in. w [14]. Aby tego dokonać, należy określić poszczególne wartości zadane dla prądów fazowych, które można utrzymywać poprzez kontrolę prądów w stacjonarnym układzie współrzędnych, tak jak to zaprezentowano w równaniu (5).

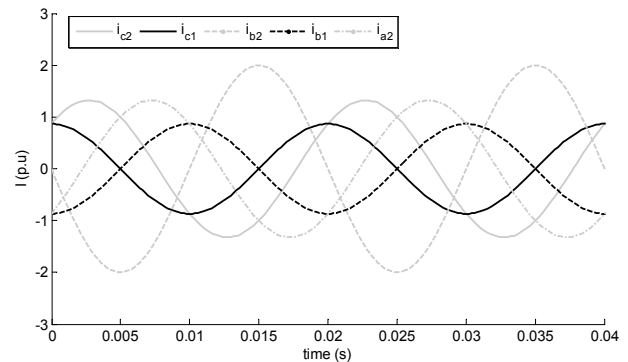
$$(5) \quad \begin{aligned} i_\alpha &= I_\alpha \\ i_\beta &= I_\beta \\ i_{x1} &= K_1 I_\alpha + K_2 I_\beta \\ i_{y1} &= K_3 I_\alpha + K_4 I_\beta \end{aligned}$$

Wartości prądów  $i_{x2}$  wynosi zero, natomiast  $i_{y2}$  może być kombinacją liniową prądów  $i_{x1}$  oraz  $i_{y1}$ . Wartości zadane prądów  $i_\alpha$  oraz  $i_\beta$  pozostają bez zmian, gdyż jak wspomniano wcześniej, to one są odpowiedzialne za wytwarzanie momentu elektromagnetycznego.

Zakładając, że wartość prądu w fazie  $a_1$  wynosi 0, a także podstawiając (2) oraz (5) do (1) otrzymujemy zestaw równań z czterema niewiadomymi. Problem ten można rozwiązać np. za pomocą iteracyjnego podstawiania poszczególnych wartości  $K_1, K_2, K_3, K_4$ , aż do uzyskania żądanych kryteriów prądów fazowych. Podstawowym kryterium jest to, aby suma rozwiązań  $a_2, b_1, b_2, c_1, c_2$  wynosiła

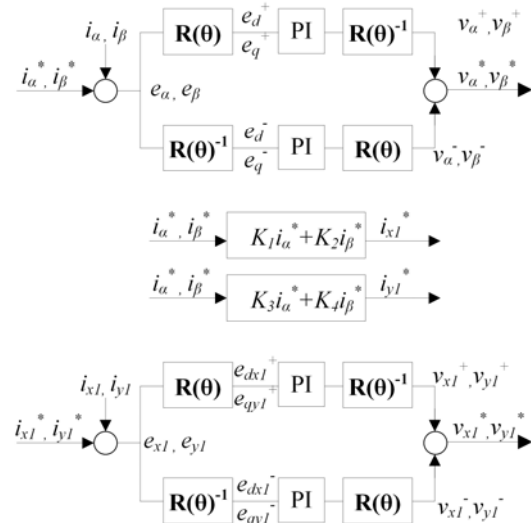
zero (wspólny punkt neutralny). Dodatkowym ograniczeniem może być np. równość amplitudy wszystkich prądów, tak aby maszyna równomiernie się nagrzewała.

Wartości te, ze względu na wspomniany sposób wyznaczania, powinny być wykonane analitycznie, a następnie uwzględnione w finalnym algorytmie sterowania jako gotowy zbiór współczynników. Ze względu na czasochłonny charakter wyznaczania wartości  $K_1-K_4$ , dla analizowanego przykładu, wyznaczono przykładowy, zestaw współczynników, spełniających jedynie podstawowe kryterium. Wyliczone wartości wynoszą odpowiednio:  $K_1 = -1, K_2 = 0, K_3 = 0, K_4 = 0$ . Rysunek 3 natomiast, przedstawia jak powinny wyglądać pozostałe po awarii prądy fazowe (dla tak wyznaczonych współczynników), które pozwalają utrzymać kołową trajektorię strumienia magnetycznego w maszynie, niwelując tym samym tętnienia momentu. Warto zwrócić uwagę nie tylko na zmienione amplitudy, ale przede wszystkim na zmianę przesunięć fazowych dla poszczególnych faz.

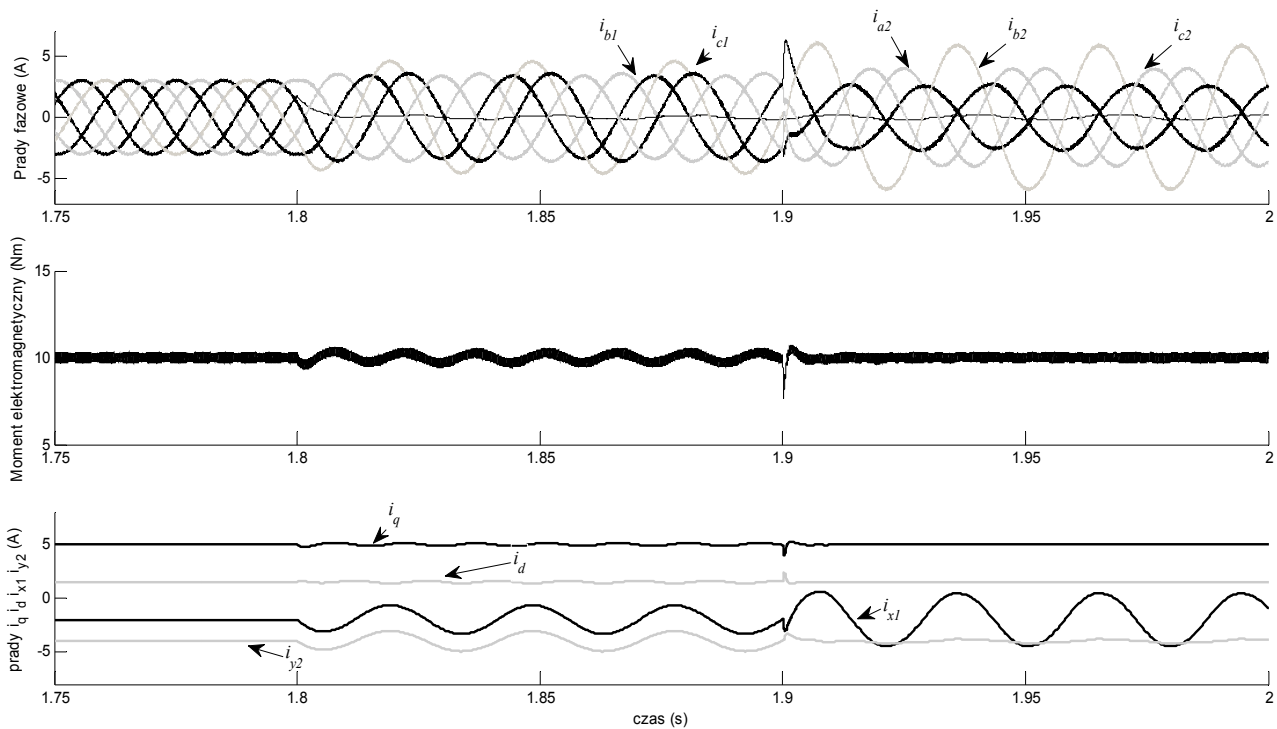


Rys.3. Przykładowe prądy zdolne utrzymać kołową trajektorię wirującego strumienia magnetycznego w przypadku utraty fazy.

Oczywiście, omówione podejście wymaga odpowiedniej modyfikacji algorytmu sterowania, który został przedstawiony na rysunku 4. Tutaj jednak zachodzi niewielka zmiana i wyjście regulatora prędkości ( $i_q^*$ ) oraz zadana wartość prądu  $i_d^*$  są od razu przekształcane do stacjonarnego układu współrzędnych, w którym odbywa się wyliczanie prądów  $i_{x1}, i_{y1}$ . Następnie regulacja prądów realizowana za pomocą pary regulatorów PI dla każdej pary zadanych wartości prądów w układzie współrzędnych wirujących zgodnie i przeciwnie do strumienia wirnika.



Rys.4. Zmiana struktury regulatorów dla pracy metody FOC podczas awarii fazy  $a_1$ .



Rys.5. Przykład działania algorytmu FOC w przypadku prawidłowej pracy (do czasu  $t=1,8$ ), w czasie awarii (od 1,8 s do 1,9 s) oraz złączonym algorytmem pracy w trybie awaryjnym (od 1,9 s).

### Wyniki symulacyjne

Model symulacyjny został wykonany w środowisku Matlab/Simulink wykorzystując do sterowania instrukcje napisane w języku C. Rysunek 5 przedstawia wyniki symulacyjne, gdzie podczas pracy obciążonej maszyny następuje awaria w fazie  $a_1$ . Przebiegi od góry przedstawiają: prądy fazowe stojana, moment elektromagnetyczny maszyny, a także prądy  $i_d$  oraz  $i_q$  w wirującym układzie współrzędnych, oraz prądy  $i_{x1}$  i  $i_{y2}$  w stacjonarnym układzie współrzędnych. W czasie awarii widoczne staje się odkształcenie prądów fazowych oraz pojawienie się tętnień na momencie elektromagnetycznym, a także pojawienie się wartości dla przebiegów prądów  $x_1$ ,  $y_2$ . Co więcej, można zauważyć, że tętnienia proporcjonalne do tętnień momentu pojawiają się również w składowych  $d$  oraz  $q$ . W chwili  $t=1,9$  s zostaje załączony algorytm pozwalający zredukować tętnienia momentu poprzez odpowiednie zmodyfikowanie prądów fazowych w sposób, który został przedstawiony w poprzedniej sekcji. Można zauważyć, że kształty prądów faz  $a_2, b_1, b_2, c_1, c_2$  odpowiadają przebiegom przedstawionym na rysunku 3. Wartości prądów w stacjonarnym układzie odniesienia są pokazane z odpowiednią składową stałą, tak aby przebiegi były czytelne na jednym oscylogramie. Przedstawione rezultaty zostały wykonane dla prędkości 100 rad/s oraz momentu obciążenia wynoszącego 10 Nm. Straty wynikające z tarcia zostały pominięte dla modelu symulacyjnego, podobnie jak czasy martwe załączania tranzystorów w przekształtniku.

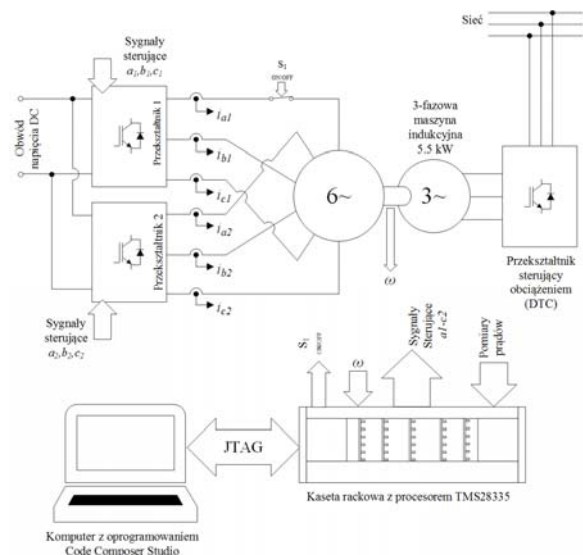
### Wyniki eksperymentalne

Poniższe wyniki przedstawiają działanie maszyny 6-fazowej sterowanej przy pomocy metody FOC zarówno w stanie pracy poprawnej i w trakcie awarii. Zaprezentowano również wpływ działania zmodyfikowanego algorytmu pozwalającego na redukcję tętnień momentu.

#### A) Stanowisko eksperymentalne

Schemat stanowiska eksperymentalnego przedstawiony został na rysunku 6. 2.2 kW, 6-fazowa maszyna indukcyjna o 2-parach biegunów zasilana jest z dwóch równolegle

połączonych 3-fazowych, 2-poziomowych przekształtników. Uzwojenia podłączone są tak, aby możliwe było zasilanie jednego trójfazowego uzwojenia z kątem pomiędzy uzwojeniami wynoszącym 120 stopni z jednego 3-fazowego przekształtnika. Połączenie takie m.in. pozwoliło badać wpływ ilości faz na hałas generowany przez maszynę wielofazową, co zostało opisane w [15]. Obydwa przekształtniki sterowane są przez interfejs światłowodowy za pomocą procesora tms28335 generującego sygnały PWM z częstotliwością 5 kHz. Również ta sama częstotliwość jest wykorzystywana do próbkowania sygnałów prądowych.



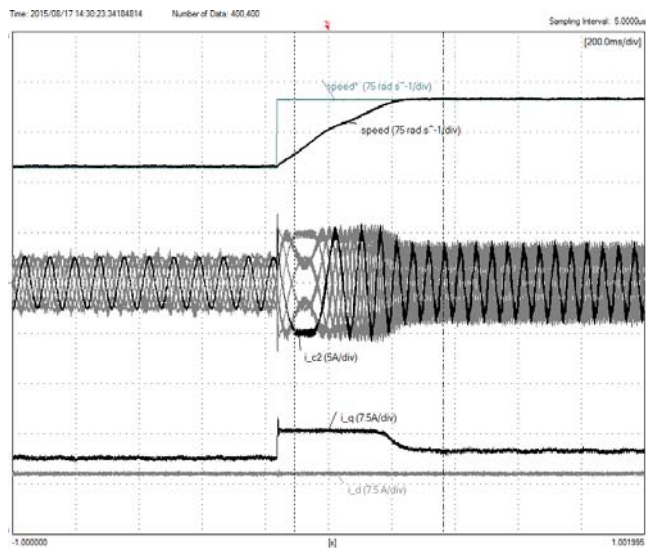
Rys.6. Schemat stanowiska eksperymentalnego

Symulowanie awarii fazy  $a_1$  maszyny, dokonywane jest za pomocą przełącznika wyzwalanego z procesora. Maszyna wielofazowa obciążana jest przez 5.5 kW maszynę indukcyjną sterowaną z przekształtnika

umożliwiającego zadawanie momentu. Dodatkowo stanowisko badawcze wyposażone jest w 4-kanalowy przetwornik C/A pozwalający generować na oscyloskopie przebiegi wybranych wewnętrznych zmiennych programu sterującego. Do rejestracji przebiegów wykorzystano 12-kanalowy oscyloskop, dzięki czemu możliwe jest przedstawienie m.in. wszystkich prądów maszyny wielofazowej.

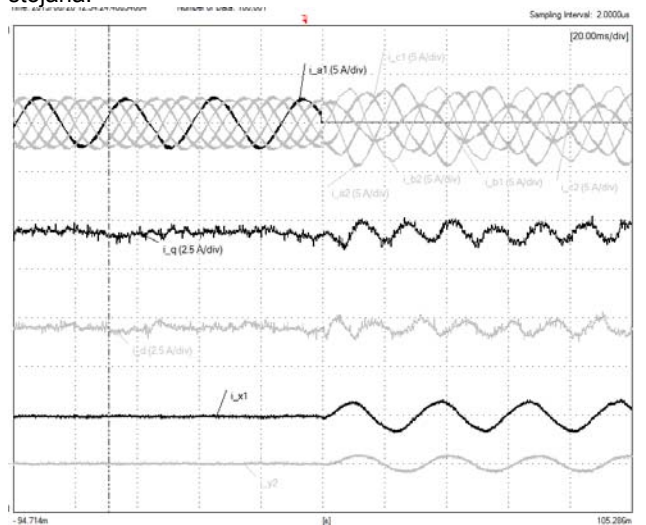
### B) Wyniki

Przebiegi przedstawione na rysunku 7 pokazują nawrót maszyny z prędkości  $-50 \text{ rad/s}$  do prędkości  $+50 \text{ rad/s}$  przy stałym momencie obciążenia wynoszącym  $10 \text{ Nm}$ . Dzięki temu obrazowane zostały dwa tryby pracy: generatorowy oraz maszynowy.

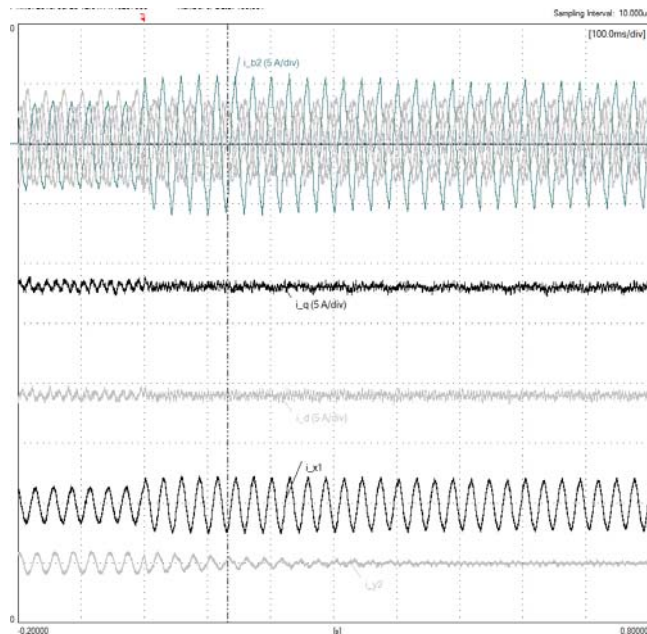


Rys.7. Nawrót 6-fazowej maszyny indukcyjnej przy stałym, zadanym obciążeniu. Od góry: prędkość mechaniczna zadana i zmierzona, prądy fazowe stojana, składowe prądów  $i_q$  oraz  $i_d$  maszyny.

Na rysunku 7 przedstawiono również składowe prądów  $i_d$  oraz  $i_q$  proporcjonalne odpowiednio do strumienia wirnika i momentu elektromagnetycznego. Można tu również zaobserwować znaczący udział wyższych harmonicznych prądów fazowych maszyny wielofazowej. Fakt ten wynika ze sprzężeń magnetycznych pomiędzy fazami przesuniętymi o  $180$  stopni (np. faza  $a_1$  i  $b_2$ ) pojawiającymi się wskutek umieszczenia ich w tych samych żłobkach stojana.



Rys.8. Awaria fazy  $a_1$  wielofazowej maszyny indukcyjnej. Od góry: prądy fazowe stojana, składowe  $i_d$ ,  $i_q$  oraz  $i_{x1}$  i  $i_{y2}$



Rys.9. Załączenie algorytmu pozwalającego na pracę w trybie awaryjnym. Od góry: prądy fazowe stojana, składowe  $i_d$ ,  $i_q$  oraz  $i_{x1}$  i  $i_{y2}$

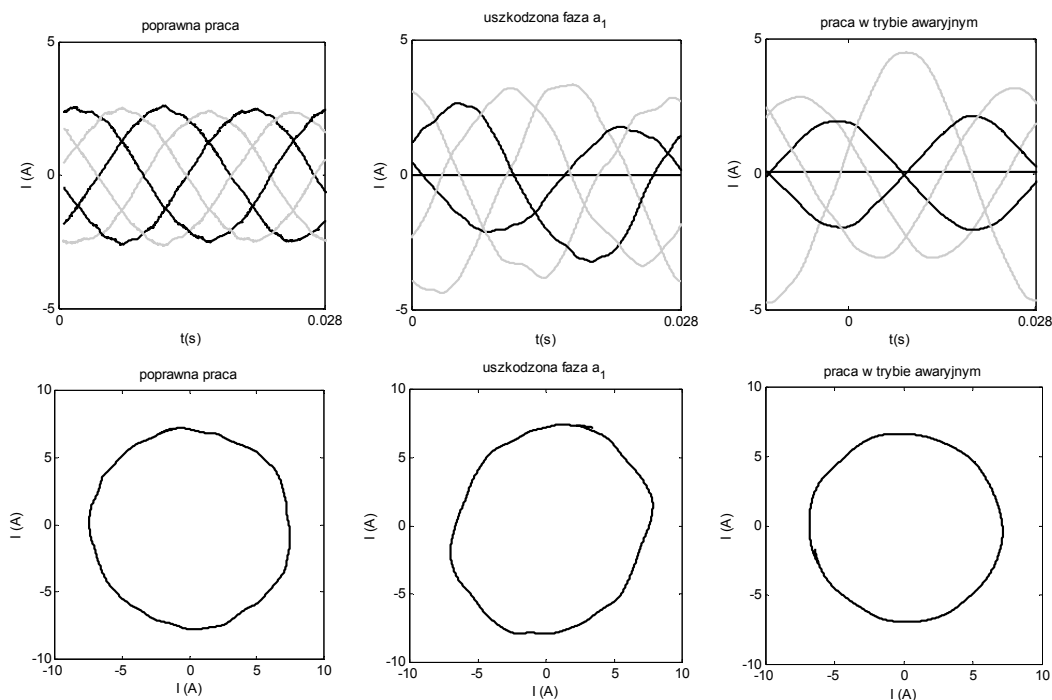
Z tego też względu pozostałe wyniki zaprezentowane na oscylogramach zarejestrowano z wykorzystaniem filtrów dolnoprzepustowych w celu zwiększenia czytelności. Rysunki 8 oraz 9 przedstawiają natomiast pracę maszyny w trybie silnikowym przy prędkości  $100 \text{ rad/s}$  z obciążeniem  $10 \text{ Nm}$  dzięki czemu możliwa jest praca z połową mocy znamionowej. Rysunek 8 przedstawia sytuację w której następuje awaria fazy  $a_1$  oraz można zauważyć, że podczas awarii tego uzwojenia zanikają wyższe harmoniczne prądu fazy  $b_2$ .

Rysunek 9 natomiast, obrazuje moment załączenia algorytmu pozwalającego na redukcję pulsacji momentu co może być widoczne na składowych prądów  $i_d$  oraz  $i_q$ . Oscylogramy na rysunku 9 pokazują również działanie regulatorów regulujących zmienne  $x_1$  oraz  $y_2$ , przy czym można zaobserwować ustalenie się wartości  $y_2$  na poziomie  $0$  zgodnie z wytycznymi przedstawionymi w sekcji „Praca w przypadku awarii”.

Rysunek 10 przedstawia natomiast powiększone i pozbowione sprzężeń prądy fazowe stojana, a także trajektorie przestrzennego wektora prądu stojana, która jest proporcjonalna do trajektorii wektora strumienia magnetycznego w maszynie. Na rysunku 10 można zaobserwować wpływ awarii fazy na odkształcenie strumienia, a także korygujący wpływ zmodyfikowanego algorytmu pozwalającego na redukcję tętnień momentu elektromagnetycznego. Kolorem czarnym na przebiegach prądów oznaczono przebiegi prądów faz  $a_1, b_1, c_1$  natomiast szarym –  $a_2, b_2, c_2$ .

### Wnioski

Wyniki przedstawione na rysunku 9 oraz 10 pokazują poprawne działanie algorytmu (wektorowego) pozwalającego na pracę bez tętnień momentu podczas utraty jednej fazy w maszynie wielofazowej. Wyniki eksperymentalne pokrywają się z symulacyjnymi, a różnice z nich wynikające spowodowane są niedokładnościami parametrów maszyny, a także omówionych sprzężeń. Z tego faktu wynikają również różne (od symulacyjnych) nastawy regulatorów – zwłaszcza w osiach  $x_1-y_1$  co można zaobserwować na rysunku 9.



Rys.9. Prądy fazowe stojana oraz trajektorie przestrzennego wektora prądu stojana dla trzech warunków pracy: praca poprawna, praca podczas uszkodzonej fazy  $a_1$ , oraz praca z przedstawionym algorytmem pozwalającym na redukcję tętnień momentu.

Ponadto, w wynikach eksperymentalnych można zaobserwować zwiększoną wartość zmiennej  $i_q$  wynikającą z pominiętych w symulacjach współczynnika tarcia, a także dodatkowych strat wynikających z uproszczonego modelu samej maszyny.

Niemniej, opracowanie algorytmu pozwalającego na pracę podczas awarii ma szczególne znaczenie dla wymienionych na wstępie systemów wytwarzania energii. Umożliwia to bowiem nieprzerwane działanie uszkodzonych jednostek pracujących w trudno dostępnych miejscach, aż do czasu naprawy ich do stanu pełnej funkcjonalności.

Na koniec warto wspomnieć, że przedstawione wyniki symulacyjne oraz eksperymentalne pokazują możliwość utrzymania tej samej mocy na wale maszyny podczas awarii fazy. Było to możliwe ponieważ maszyna nie pracowała przy wartościach znamionowych. Jeśli taka sytuacja występuje należy uwzględnić ograniczenia wynikające ze znamionowych wartości prądów, które uzwojenia maszyny mogą przewodzić. Alternatywą może być także takie dobranie i przewymiarowanie poszczególnych elementów systemu, aby nawet w trakcie awarii układ mógł pracować ze znamionową mocą.

*Przedstawione badania są realizowane w ramach projektu 2012/07/N/ST7/03322 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.*

**Autorzy:** mgr inż. Michał Rolak, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, Polska, E-mail: [michal.rolak@ee.pw.edu.pl](mailto:michal.rolak@ee.pw.edu.pl)

#### LITERATURA

[1] Corbetta G., Pineda I., Moccia J., The European offshore wind industry - key trends and statistics 2013, (2014).  
 [2] Chen H., Ait-Ahmed N., Zaim E. H., Machmoum M., Marine tidal current systems: State of the art, 2012 IEEE Int. Symp. Ind. Electron., (2012), 1431–1437  
 [3] Ribrant J., Bertling L., Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997-2005,

Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE, (2007), 1–8  
 [4] Maples B., Saur G., Hand M., Maintenance Strategies to Reduce the Cost of Offshore Wind Energy Installation, Operation and Maintenance Strategies to Reduce the Cost of Offshore Wind Energy, (2013), n. July  
 [5] Elghali S. E., Ben, Benbouzid M. E. H., Charpentier J. F., Marine Tidal Current Electric Power Generation Technology: State of the Art and Current Status, 2007 IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf., vol. 2, (2007), 1407–1412  
 [6] Liu T.-H., Fu J.-R., Lipo T. A., A strategy for improving reliability of field-oriented controlled induction motor drives, *Ind. Appl. IEEE Trans.*, 29 (1993), n.5, 910–918  
 [7] Burzanowska H., Sario P., Stulz C., Joerg P., Redundant Drive with Direct Torque Control (DTC) and Dual-Star Synchronous Machine, European Conference on Power Electronics and Applications, 2007  
 [8] Levi E., Multiphase electric machines for variable-speed applications, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 55 (2008), n.5, 1893–1909  
 [9] Rolak M., Malinowski M., Post-fault Operation of Multiphase Energy Generation System, 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics, CPE 2015, Lisboa 2015  
 [10] Levi E., 3. Multiphase AC Machines, Power Electronics and Motor Drives, 2010 2<sup>nd</sup> edition, 1–32  
 [11] Levi E., Bojoi R., Profumo F., Toliyat H. a., and Williamson S., Multiphase induction motor drives – a technology status review, *IET Electr. Power Appl.*, 1 (2007), n.4, 489  
 [12] Rolak M., Malinowski M., Modelling of 6-phase symmetrical induction machine under fault states, IX Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna Postępy w Elektrotechnice Stosowanej, (2014), 185–188  
 [13] Rolak M., Post-fault operation of FOC-controlled 5-phase induction machine with hysteresis and PI+SVM current control, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr 5, 144–148  
 [14] Che H. S., Duran M. J., Levi E., Jones M., Hew W.-P., Rahim N. A., Postfault Operation of an Asymmetrical Six-Phase Induction Machine With Single and Two Isolated Neutral Points, *IEEE Trans. Power Electron.*, 29 (2014), n.10, 5406–5416  
 [15] Rolak M., A Symmetrical 6-phase Induction Machine Audible Noise Experimental Investigation, Doctoral School of Energy and Geotechnology II Conf proceedings, (2015), 126–130