

## GENERATOR INDUKCYJNY Z MASZYNĄ DWUSTRONNIE ZASILANĄ W UKŁADZIE BEZ STYKÓW ŚLIZGOWYCH

*Rozpatrywany w artykule generator indukcyjny z maszyną dwustronnie zasilaną w układzie bezstykowym składa się z dwóch maszyn asynchronicznych, których wirniki sztywno połączono ze sobą mechanicznie i elektrycznie. Zaletą takiego układu jest możliwość dwustronnego zasilania – przy wyeliminowaniu styków ślizgowych. Podczas gdy stojan pierwszej maszyny jest bezpośrednio połączony z siecią, prądy i napięcia po stronie stojana drugiej maszyny mogą być wymuszane przy użyciu przekształtnika energoelektronicznego dla realizacji zadanego przepływu mocy czynnej i biernej. Przedstawiono schemat zastępczy generatora indukcyjnego w układzie bezstykowym jak również dokonano analizy wybranych stanów pracy układu w programie symulacyjnym PSIM.*

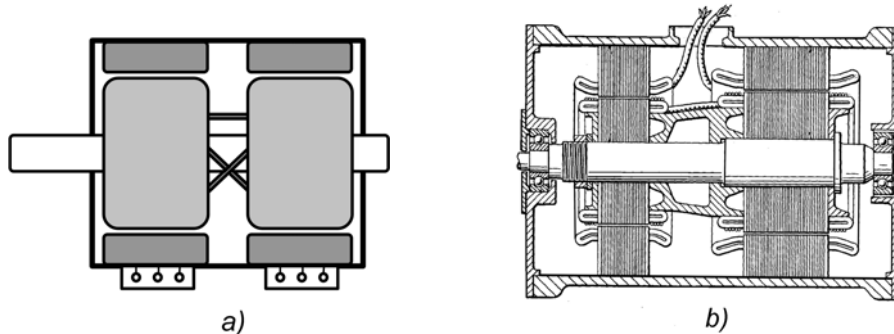
### 1 WSTĘP

Generatory indukcyjne pierścieniowe mogą generować moc, zarówno przy prędkości nadsynchronicznej jak i podsynchronicznej [1]. Zaletą generatorów pierścieniowych jest możliwość regulacji przepływu mocy czynnej i biernej w szerokim zakresie, przy zastosowaniu od strony zacisków wirnika przekształtnika energoelektronicznego, o mocy znamionowej stanowiącej ułamkową wartość mocy generatora. Wadą generatorów pierścieniowych jest występowanie problemów z pierścieniami ślizgowymi i szczotkami, co prowadzi do obniżenia niezawodności. Zwłaszcza szczotki wymagają regularnej wymiany i przeglądów. W ciągu ostatnich lat na świecie wzrosło zainteresowanie niekonwencjonalnymi bezszczotkowymi prądnicami indukcyjnymi, o dwustronnym zasilaniu, wykorzystującymi właściwości maszyn asynchronicznych [2] – [4].

Na rysunku 1 pokazany został schemat ideowy oraz widok przekroju poprzecznego bezszczotkowej maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej (BMDZ). Umieszczone we wspólnej obudowie dwie sekcje maszyny, z których każda zawiera trójfazowe uzwojenie stojana i trójfazowe uzwojenie wirnika, odpowiadają kaskadowemu połączeniu „na sztywno” dwóch maszyn indukcyjnych. Zaciski obydwu stojanów są wprowadzone na zewnątrz, umożliwiając dwustronne zasilanie bez pośrednictwa styków ślizgowych. Podstawowe właściwości BMDZ zależą od konfiguracji wzajemnego połączenia zacisków dwóch trójfazowych uzwojeń wirnika.

---

<sup>1</sup> Akademia Morska w Gdyni, ul. Morska 81-87, 81-225, madamowi@am.gdynia.pl



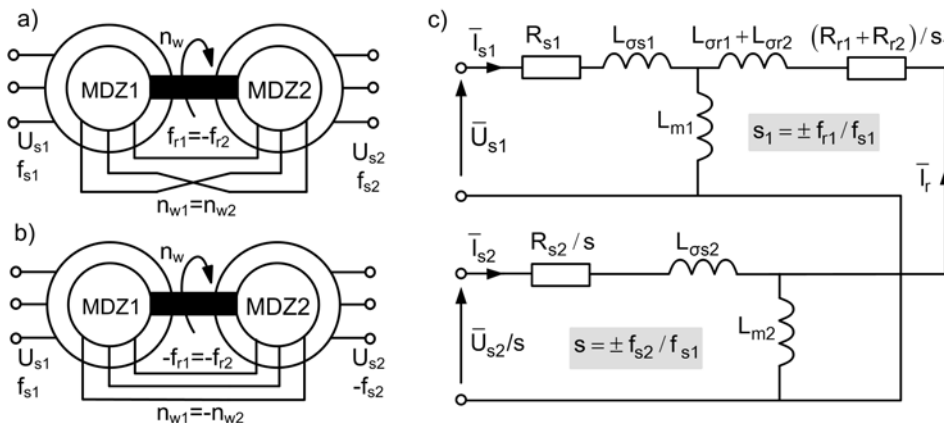
Rys. 1. Układ bezszczotkowej maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej: (a) schemat ideowy; (b) widok przekroju maszyny

## 2 STAN USTALONY BMDZ

Zasada działania BMDZ z rysunku 1 polega na tym aby pola w dwóch sekcjach wirnika wirowały w przeciwnych kierunkach względem wału. Na rysunkach 2.a) i 2.b) pokazano kaskadowe połączenie dwóch maszyn indukcyjnych dwustronnie zasilanych (MDZ) [2] jako układ równoważny BMDZ z rysunku 1. Dla dwóch jednakowych maszyn MDZ1 oraz MDZ2 można wyróżnić dwie konfiguracje połączeń wirników:

- połączenie uzwojeń ze „skrzyżowanymi” dwoma fazami i wały połączone „jeden za drugim”, co oznacza ten sam kierunek obrotów wałów:  $n_{w1} = n_{w2}$
- połączenie zgodne uzwojeń „faza do fazy”, a wały połączone „naprzeciw siebie”, co oznacza przeciwne kierunki obrotów wałów obydwu MDZ:  $n_{w1} = -n_{w2}$ .

W przypadku innego połączenia wałów momenty wytwarzane przez obydwie maszyny będą oscylacyjne. Na rysunku 2.c) przedstawiono schemat zastępczy BMDZ. Zaznaczone wielkości fazowe są odniesione do strony pierwszego stojana.



Rys. 2. BMDZ jako kaskadowe połączenie dwóch MDZ: konfiguracje połączeń uzwojeń wirników (a) i (b); schemat zastępczy BMDZ (c)

Na schemacie zastępczym z rysunku 2.c widać wpływ poślizgu  $s_1$  pierwszej maszyny na wartość rezystancji wirnika BMDZ oraz wpływ poślizgu całkowitego  $s$  na wartość rezystancji drugiego stojana.

Niezależnie od konfiguracji połączeń wirników, dla obydwu maszyn zachodzą następujące zależności:  $f_{r1} = f_{s1} - (p_1 n_w / 60)$  dla MDZ1 oraz  $f_{r2} = f_{s2} - (p_2 n_w / 60)$  dla MDZ2. W pracy autorzy rozpatrzyli przypadek kaskadowego połączenia dwóch jednakowych MDZ o mocy 2,2kW oraz liczbie par biegunów  $p = 2$  każda. Zastosowano konfigurację połączeń wirników typu „a”, dla której zachodzi:

$$f_{r1} = -f_{r2}, \quad (1)$$

Podstawiając zależności na  $f_{r1}$  oraz  $f_{r2}$  do (1) uzyskuje się podstawową zależność regulacyjną BMDZ, pomiędzy prędkością obrotową wału  $n_w$  a częstotliwością drugiego stojana  $f_{s2}$ , przy danej częstotliwości sieci  $f_{s1}$ :

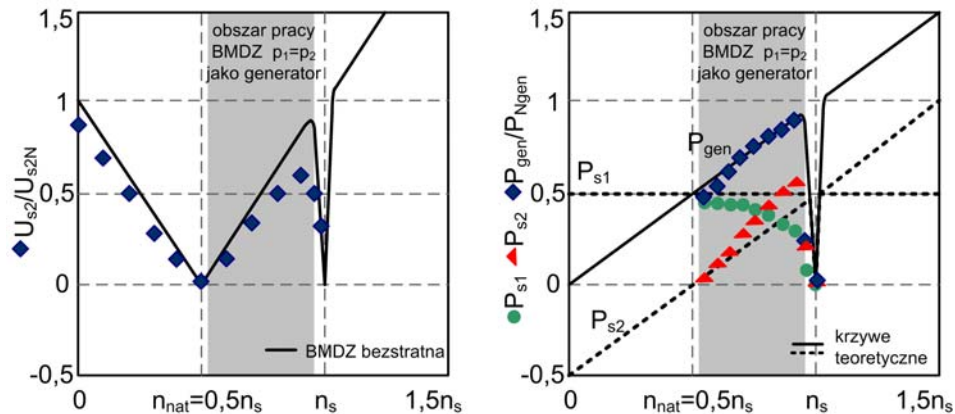
$$n_w = \frac{60(f_{s1} + f_{s2})}{p_1 + p_2} \quad (2)$$

Przy braku zewnętrznego wymuszenia na wale i zwartych uzwojeniach drugiego stojana, wał rozpatrywanej BMDZ będzie obracała się z własną prędkością synchroniczną, nazywaną również prędkością naturalną  $n_{ws} = n_{nat}$ :

$$n_{nat} = \frac{f_{s1} \cdot 60}{p_1 + p_2} = 750 \text{ obr/min}, \quad (3)$$

która jest równa połowie prędkości synchronicznej pojedynczej MDZ.

Na rysunku 3 pokazano wyniki symulacji w programie PSIM kaskady dwóch MDZ 2,2kW. Na rysunku 3.a pokazano zmiany napięcia drugiego stojana w funkcji prędkości obrotowej przy rozwartym drugim stojanie, a na rysunku 3.b przebiegi generowanej mocy pierwszego stojana  $P_{s1}$ , drugiego stojana  $P_{s2}$  i całkowitej mocy generatora  $P_{gen}$ .



Rys. 3. Stan ustalony BMDZ: zmiany napięcia drugiego stojana (a) oraz generowanej mocy (b) w funkcji prędkości obrotowej

Przy prędkości synchronicznej  $n_s=2n_{nat}$  następuje załamanie charakterystyk z rysunku 3. Amplituda i częstotliwość napięcia drugiego stojana oraz generowane po obydwu stronach moce są wówczas równe zero. W tym punkcie pracy obydwie MDZ tracą wzajemne sprzężenie i nie mogą być rozpatrywane jako jeden układ.

### 3 WNIOSKI

Zastosowanie BMDZ w małej elektrowni wiatrowej lub wodnej pozwala na wyeliminowanie styków ślizgowych maszyny, przy uzyskaniu korzystnej wartości mocy znamionowej przekształtnika energoelektronicznego po stronie wtórnej - blisko dwukrotnie mniejszej od całkowitej mocy znamionowej generatora. Podstawowe właściwości BMDZ zależą od konfiguracji wzajemnego połączenia dwóch trójfazowych uzwojeń wirnika. Łącząc kaskadowo dwie MDZ ze skrzyżowaniem faz uzwojeń wirnika uzyskuje się dwukrotne zmniejszenie prędkości synchronicznej oraz zmniejszenie prędkości obrotowej całego zakresu pracy.

### 4 LITERATURA

1. Bogalecka E.: *Zagadnienia sterowania maszyną dwustronnie zasilaną pracującą jako prądnica w systemie elektroenergetycznym*, Wydawnictwo Uczelniane Akademii Morskiej w Gdyni, 1997.
2. Basic D., Zhu J. G., Boardman G.: *Transient Performance Study of a Brushless Doubly Fed Twin Stator Induction Generator*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, no. 3, 2003, pp. 400 – 408.
3. McMahan R.A., Roberts P.C., Wang X., Tavner P.J.: *Performance of BDFM as generator and motor*, IEE Proceedings Electr. Power Appl., Vol. 153, No. 2, March 2006, pp. 289 – 299.
4. F. Runcos, R. Carlson, N. Sadowski and P. Kuo-Peng: *Performance Analysis Of A Doubly Fed Twin Stator Cage Induction Generator*, in Recent Developments of Electrical Drives (eds: S. Wiak, M. Doms, K. Komeza ), Springer, 2006, pp. 361 – 373.

## CASCADED DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR

Cascaded doubly fed induction generator (CDFIG) examined in the paper consists of two identical wound rotor induction machines having their rotors mechanically and electrically coupled. While stator of the first machine is directly connected to the grid, the stator currents and voltages of the second machine can be manipulated for power generation requirements. The paper presents an equivalent circuit of CDFIG at steady state as well steady state characteristics of the cascaded machine.