

*prądnica trójfazowa, elektrownia wiatrowa,
magnesy trwałe, obliczenia, przebiegi czasowe,
stabilizacja napięcia*

Marek CIURYS*, Manswet BAŃKA*,
Ignacy DUDZIKOWSKI*

PRĄDNICA TRÓJFAZOWA MAŁEJ MOCY WZBUDZANA MAGNESAMI TRWAŁYMI

Opracowano algorytm i program obliczeń projektowych prądnic trójfazowych z magnesami trwałymi. Zastosowano metodę obwodowo-półową. Zaprojektowano prądnicę oraz wyznaczono jej parametry ruchowe podczas pracy przy różnej prędkości obrotowej, w różnej temperaturze otoczenia. Dobrano układ stabilizacji napięcia oraz zamodelowano układ: generator – układ stabilizacji napięcia – odbiory. Wyznaczono przebiegi czasowe w analizowanym układzie.

1. WSTĘP

W elektrowniach wiatrowych i wodnych małej mocy coraz częściej stosowane są generatory wzbudzone magnesami trwałymi. Ich zaletą jest duża sprawność i niezawodność, wyeliminowanie pierścieni ślizgowych i szczotek oraz układu regulacji prądu wzbudzenia. W porównaniu z generatorami asynchronicznymi ich zaletą jest brak poboru mocy biernej. W elektrowniach wiatrowych małej mocy ich udział wynosi około 50%. Pracują one zwykle z prędkością 1500–3000 obr/min [1]. Między turbiną wiatrową a generatorem stosowana jest przekładnia mechaniczna.

Zmienna prędkość obrotowa turbiny wiatrowej jest przyczyną zmiany wartości i częstotliwości indukowanej w uzwojeniu siły elektromotorycznej (rys. 4). Bez układu stabilizacji napięcia i częstotliwości prądnica taka nadaje się tylko do celów grzewczych. Praca na lokalną sieć wydzieloną lub współpraca z siecią energetyczną wymaga zastosowania układu stabilizacji wartości i częstotliwości napięcia.

Celem pracy jest analiza parametrów zaprojektowanej prądnicy prądu przemiennego wzbudzonej magnesami trwałymi.

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, marek.ciurys@pwr.wroc.pl, ignacy.dudzikowski@pwr.wroc.pl

Zakres pracy obejmuje:

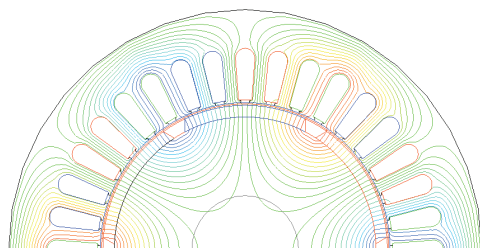
- opracowanie algorytmu elektromagnetycznych obliczeń projektowych prądnicy,
- opracowanie programu obliczeniowego,
- projekt trójfazowego generatora,
- obliczenia polowe generatora,
- wyznaczenie parametrów ruchowych generatora bez układu stabilizacji napięcia,
- dobór układu stabilizacji napięcia i częstotliwości,
- opracowanie w programie Matlab/Simulink modelu układu: generator–układ stabilizacji napięcia–odbiory,
- wyznaczenie przebiegów czasowych w układzie ze stabilizacją napięcia.

2. ANALIZA PARAMETRÓW PRĄDNICY

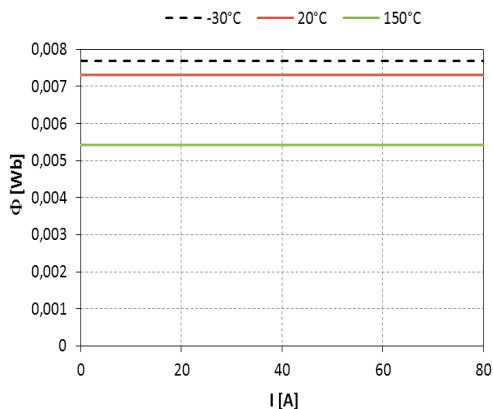
Opracowano algorytm i program obliczeń elektromagnetycznych umożliwiające wyznaczenie parametrów ruchowych prądnicy przy różnej prędkości obrotowej i różnym obciążeniu z uwzględnieniem strat mocy i wpływu temperatury. Po wstępnym doborze wymiarów magnesów i wymiarów obwodu magnetycznego oraz uzwojenia wykonywane są obliczenia polowe projektowanej maszyny oraz korekta wymiarów obwodu magnetycznego w celu uzyskania możliwie dużej wartości strumienia magnetycznego i minimalizacji momentu zaczepowego (rys. 3). Wyniki obliczeń polowych finalnego obwodu magnetycznego wykorzystywane są w opracowanym programie do doboru uzwojenia, obliczenia parametrów prądnicy, strat mocy, przyrostów temperatury i charakterystyk ruchowych. Straty mocy i przyrosty temperatury wyznaczono na podstawie [4]. Analizę obliczeniową przeprowadzono na przykładzie zaprojektowanej prądnicy o mocy 5 kW i napięciu znamionowym 400 V. Do budowy stojana zastosowano blachę o typowym wykroju stosowanym w maszynach asynchronicznych. Zastosowano magnesy neodymowe typu N33Sh. Przekrój poprzeczny zaprojektowanej maszyny przedstawiono na rysunku 1.

2.1. WYNIKI OBLICZEŃ POLOWYCH

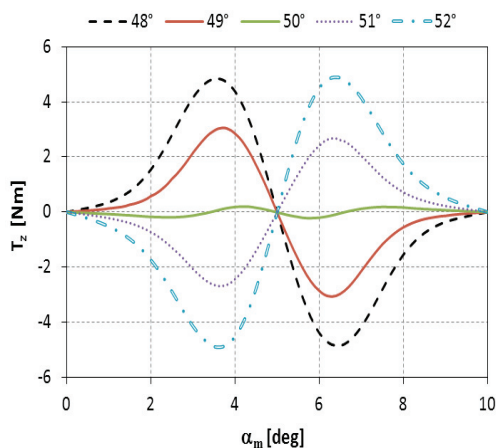
Analizę pola magnetycznego wykonano za pomocą programu Maxwell. Obliczono wartości strumienia w temperaturze magnesów (–30), 20 oraz 150 °C, przy różnych wartościach prądu obciążenia. Wartości temperatury magnesów wynikają ze zmiany temperatury otoczenia w przedziale (–30)–(40) °C i przyrostów temperatury. Wyniki obliczeń polowych przedstawiono na rysunkach 1–4. Przykładowe charakterystyki ruchowe zaprojektowanej prądnicy przedstawiono na rysunkach 5 i 6. Dotyczą one indywidualnej pracy prądnicy (bez układu stabilizacji napięcia).



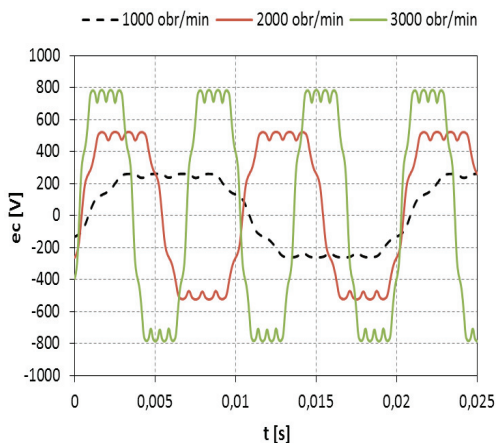
Rys. 1. Rozpływ strumienia magnetycznego w stanie bezprądowym
Fig. 1. Magnetic flux distribution; no-load state



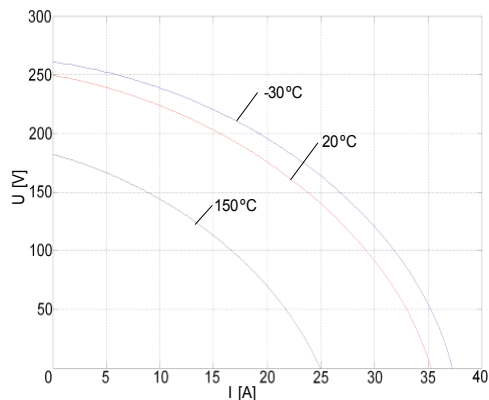
Rys. 2. Strumień magnetyczny w szczelinie w różnej temperaturze magnesów
Fig. 2. Magnetic flux, at different permanent magnets temperature, as a function of the current



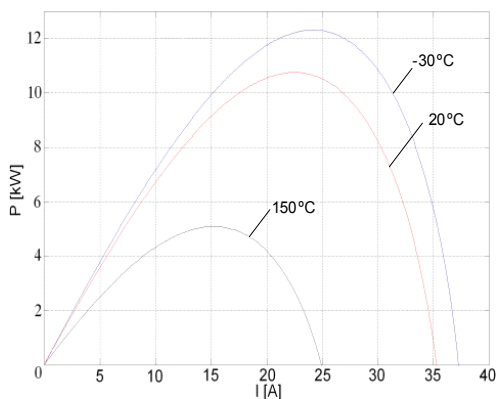
Rys. 3. Moment zaczepowy jako funkcja kąta obrotu wirnika przy różnych wartościach kąta magnesów; $\theta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
Fig. 3. Cogging torque versus rotor position with variations in magnets angle; $\theta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$



Rys. 4. Przebiegi czasowe fazowej siły elektromotorycznej prądu przy różnej prędkości obrotowej; $\theta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
Fig. 4. Electromotive force of the generator at different rotational speed; $\theta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$



Rys. 5. Charakterystyki zewnętrzne prądnicy przy różnej temperaturze magnesów ($n = \text{const} = 1000 \text{ obr/min}$, $\cos\varphi = 1$)
 Fig. 5. External characteristic of the generator at different magnets temperature ($n = \text{const} = 1000 \text{ rpm}$, $\cos\varphi = 1$)

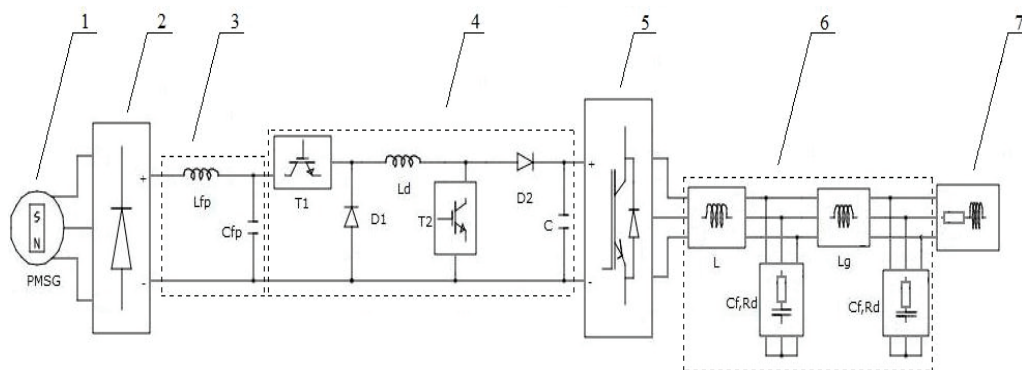


Rys. 6. Charakterystyka $P = f(I)$ ($n = \text{const} = 1000 \text{ obr/min}$, $\cos\varphi = 1$)
 Fig. 6. $P = f(I)$ characteristic ($n = \text{const} = 1000 \text{ rpm}$, $\cos\varphi = 1$)

2.2. WSPÓLPRACA PRĄDNICY Z UKŁADEM STABILIZACJI NAPIĘCIA

Podczas pracy prądnicy na lokalną sieć wydzieloną konieczna jest stabilizacja wartości oraz częstotliwości napięcia w celu spełnienia wymagań dotyczących zasilania odbiorników energii elektrycznej. W środowisku Matlab/Simulink zamodelowano układ (rys. 7): prądnica z magnesami trwałymi (1) – układ stabilizacji napięcia (2–6) – odbiorniki energii elektrycznej (7). Analizowany układ stabilizacji napięcia (rys. 7) składa się z: prostownika diodowego sześciopulsowego (2), filtra LC (3), przekształtnika DC/DC podwyższająco-obniżającego napięcie (4), falownika tranzystorowego PWM (5) oraz filtra wyjściowego (6).

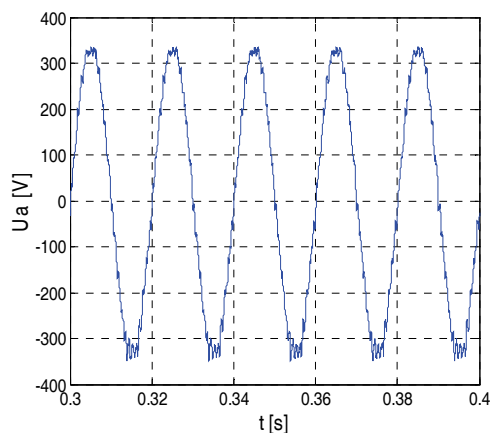
Zaprojektowana prądnica z magnesami trwałymi została zamodelowana, jako układ trójfazowych źródeł napięcia, o przebiegach czasowych wyznaczonych za pomocą obliczeń polowych przy różnej prędkości obrotowej maszyny (rys. 4). Szeregowo z zamodelowanymi źródłami napięć włączono impedancje uwzględniające rezystancję oraz reaktancję uzwojenia. Zadaniem sześciopulsowego prostownika diodowego jest zamiana napięcia przemiennego generowanego przez prądnicę na napięcie stałe. Dla stanów pracy prądnicy gdy napięcie to jest za niskie, aby na wyjściu falownika, sterowanego metodą modulacji szerokości impulsów, uzyskać przebieg o wartości skutecznej podstawowej harmonicznnej 230/400 V, zastosowano przekształtnik DC/DC podwyższający jego wartość.



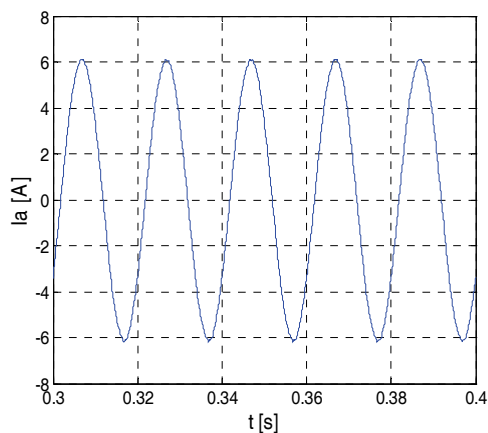
Rys. 7. Ilustracja zamodelowanego układu
Fig. 7. Modelled system illustration

Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej prądnicy, proporcjonalnie wzrasta również wartość indukowanego na jej zaciskach napięcia. Z tego względu w układzie zastosowano również przekształtnik DC/DC obniżający napięcie. Obydwa przekształtniki (podwyższający oraz obniżający) połączone są w topologii kaskadowej [3].

O tym, czy napięcie jest podwyższane czy obniżane, decyduje wartość napięcia na wyjściu prostownika. Układ przekształtnika DC/DC został wyposażony w wejściowy filtr LC (3), który ma za zadanie ograniczyć wyższe harmoniczne prądu w obwodzie prostownik–przekształtnik obniżający napięcie.



Rys. 8. Przebieg napięcia fazowego na odbiorniku;
 $n = 2000$ obr./min, $P = 2,5$ kW
Fig. 8. Output phase voltage;
 $n = 2000$ rpm, $P = 2.5$ kW

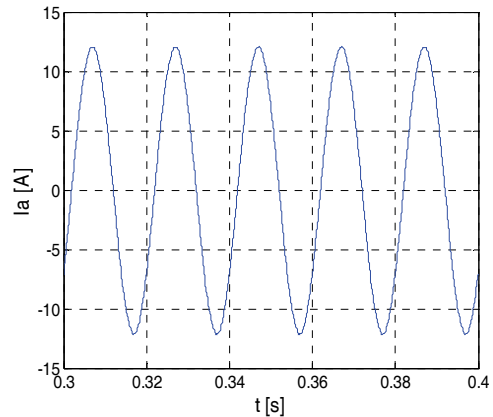
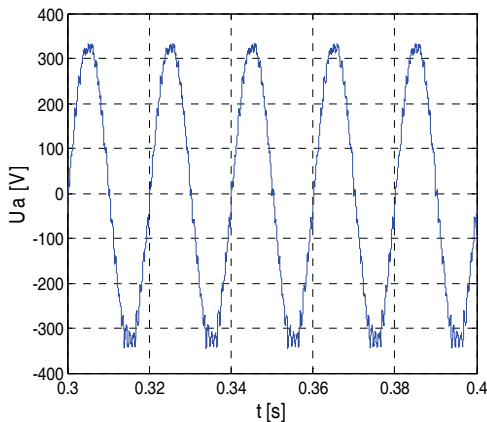


Rys. 9. Przebieg prądu fazowego odbiornika;
 $n = 2000$ obr./min, $P = 2,5$ kW
Fig. 9. Output phase current;
 $n = 2000$ rpm, $P = 2.5$ kW

Zastosowany falownik napięcia zbudowany został z tranzystorów IGBT i jest sterowany metodą modulacji szerokości impulsów. Częstotliwość i amplituda fali nośnej (napięcia trójkątnego) są stałe, natomiast zmienny jest współczynnik modulacji amplitudy. Jego większa wartość umożliwia [3] zmniejszenie udziału wyższych harmonicznych w napięciu wyjściowym.

Ostatnim elementem układu jest dwustopniowy filtr wygładzający LCLC znajdujący się na wyjściu falownika. Jego parametry dobrano na podstawie algorytmu opisanego w [2].

Przykładowe wyniki obliczeń przebiegów czasowych napięcia oraz prądu na wyjściu układu stabilizacji przedstawiono na rysunkach 8–11. Dotyczą one obciążenia układu mocą $P = 2,5 \text{ kW}$ przy $n = 2000 \text{ obr/min}$ oraz 5 kW przy $n = 3000 \text{ obr/min}$. Współczynnik mocy wynosił $\cos\varphi = 0,86$.



Rys. 10. Przebieg napięcia fazowego na odbiorniku;
 $n = 3000 \text{ obr./min}$, $P = 5 \text{ kW}$

Rys. 10. Output phase voltage;
 $n = 3000 \text{ rpm}$, $P = 5 \text{ kW}$

Rys. 11. Przebieg prądu fazowego odbiornika;
 $n = 3000 \text{ obr./min}$, $P = 5 \text{ kW}$

Fig. 11. Output phase current;
 $n = 3000 \text{ rpm}$, $P = 5 \text{ kW}$

3. PODSUMOWANIE

Opracowano algorytm i program obliczeń projektowych trójfazowych prądnic wzbudzanych magnesami trwałymi. Umożliwiają one zaprojektowanie prądnicy oraz wyznaczenie jej parametrów podczas pracy przy różnej prędkości obrotowej, w różnej temperaturze otoczenia, przy obciążeniu różną mocą. Maksymalna moc obciążenia przy różnej prędkości obrotowej prądnicy wynika z dopuszczalnego przyrostu temperatury uzwojenia. W zaprojektowanej prądnicy moment zaczepowy ograniczono praktycznie do zera (rys. 3). Jest to bardzo istotne podczas pracy prądnicy w elek-

trowni wiatrowej. Przy wyznaczaniu parametrów ruchowych w różnych warunkach pracy należy uwzględnić zmiany strumienia magnetycznego wynikające ze zmiany temperatury magnesów. W analizowanej maszynie zmiany strumienia (rys. 2) wynoszą 30%. Zastosowany układ stabilizacji napięcia i częstotliwości (wraz z filtrem) umożliwił ograniczenie współczynnika THD w przebiegu napięcia na odbiorniku do wartości 5,0%, a w przebiegu prądu pobieranego przez odbiornik do 0,8%. Uzyskane wartości THD spełniają wymagania dotyczące jakości energii elektrycznej nie tylko w sieciach wydzielonych, ale również w publicznych sieciach zasilających [5]. Opracowany algorytm i program są przydatne do projektowania prądnic trójfazowych o różnej mocy.

LITERATURA

- [1] JASTRZĘBSKA G., *Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2009.
- [2] LISERRE M., BLAABJERG F., HANSEN S., *Design and Control of an LCL-Filter-Based Three-Phase Active Rectifier*, IEEE Trans. on Industry Applications, 2005, Vol. 41, 1281–1291.
- [3] PIRÓG S., *Energoelektronika. Układy o komutacji sieciowej i o komutacji twardej*, AGH Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2006.
- [4] SIERGIEJEW S., WINOGRADOW N.W., GORIAINOW F.A., *Projektirowanie elektricznych masin*, Energia, Moskwa 1969.
- [5] Norma EN 50 160: 2007. *Charakterystyki napięcia w publicznych sieciach zasilających*.

LOW-POWER THREE-PHASE PERMANENT MAGNETS GENERATOR

An algorithm and a program for designing of the three-phase generators with permanent magnets were developed. Circuit-field method was used. By the use of the developed algorithm and program permanent magnet generator was designed and its operating parameters at different speed and at different magnet temperature were determined. The system: generator–voltage stabilization system – loads was modeled. Voltage and current transients in the analyzed system were determined.