

Stanisław Gawron
BOBRME Komel, Katowice

PRĄDNICE SYNCHRONICZNE Z MAGNESAMI TRWAŁYMI O MAŁEJ ZMIENNOŚCI NAPIĘCIA WYJŚCIOWEGO

PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR WITH LOW OUTPUT VOLTAGE VARIABILITY

Abstract: This paper presents the construction of a permanent magnets synchronous generator model. The computational methodology and the basic results of electromagnetic calculations of the synchronous generator with permanent magnets are presented. On the basis of the calculations conducted, a physical model of the generator was made, on which the preliminary laboratory tests were carried out. A comparative record sheet of the preliminary laboratory tests and the results of the theoretical calculations are also included in the paper. The main advantage of presented model of a permanent magnets synchronous generator is low output voltage variability.

1. Wstęp

Prądnice synchroniczne z magnesami trwałymi ze względu na swoje podstawowe własności znalazły szerokie zastosowanie głównie w elektrowniach wiatrowych [1, 2], gdzie się sprawdziły i są coraz powszechniej stosowane.

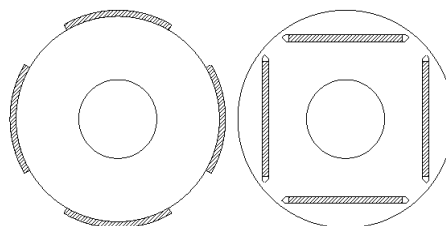
Maszyny te charakteryzują się [3]:

- dużą sprawnością,
- największą gęstością mocy w jednostce objętości.

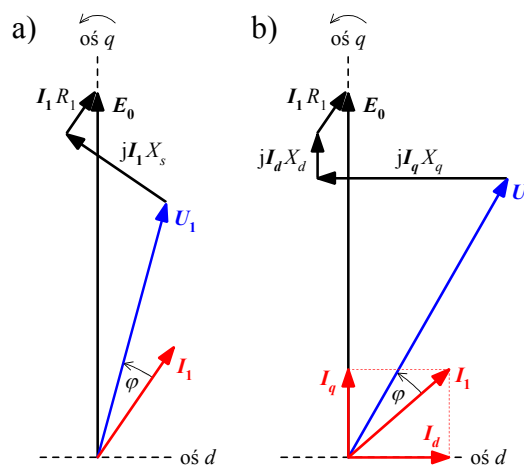
Prądnice synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi, w rozwiązaniu standardowym, nie mają możliwości regulacji wzbudzenia. W prądnicach tych istotnym parametrem jest zmienność napięcia $\Delta U\%$. Zmienność napięcia $\Delta U\%$ zależy w bardzo istotny sposób od konstrukcji wirnika prądnicy. Z obliczeń wynika, że zmienność napięcia maszyn z magnesami na powierzchni wirnika, dla których reaktancje synchroniczne w osiach podłużnej d i poprzecznej q wirnika są jednakowe ($X_d = X_q = X_s$) jest większa, niż w maszynach z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz wirnika (gdy $X_d < X_q$) [4]. Ilustruje to rysunek 2.

Produkowane obecnie w KOMELu prądnice z magnesami trwałymi charakteryzują się stosunkowo dużą zmiennością napięcia (sięgającą 20÷30%), która dyskredytuje je do bezpośredniego zainstalowania, np. w agregatach prądotwórczych lub w hydroelektrowniach. Autor pracuje nad rozwiązaniem obwodu magnetycznego prądnicy, w którym zmienność napięcia $\Delta U\% \leq 10\%$.

Na rysunku 1 pokazano dwa warianty rozwiązań wirników z magnesami trwałymi: z magnesami klejonymi na powierzchni i z magnesami umieszczonymi wewnątrz pakietu blach.



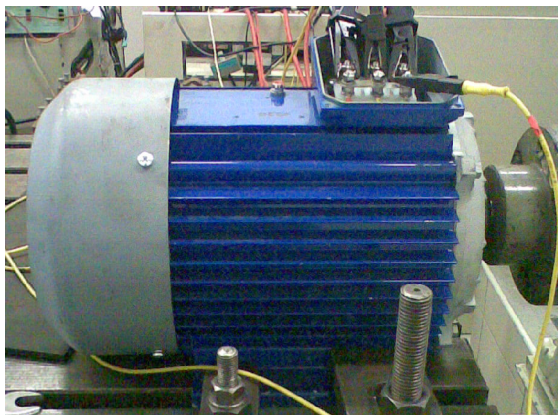
Rys. 1. Przykładowe przekroje poprzeczne wirników maszyn wzbudzanych magnesami trwałymi wg rozwiązania BOBRME Komel



Rys. 2. Wykresy wektorowe napięć prądnic synchronicznych z magnesami trwałymi mocowanymi a) na powierzchni wirnika i b) wewnątrz wirnika

2. Budowa prądnicy modelowej

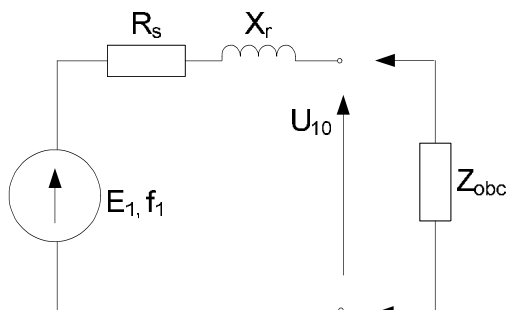
Pokazany na rysunku 3 model fizyczny prądnicy zbudowano wykorzystując zunifikowane podzespoły produkowanych maszyn elektrycznych.



Rys. 3. Model fizyczny prądnicy z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz wirnika na stanowisku laboratoryjnym

3. Model matematyczny prądnicy

Korzystając ze schematu zastępczego prądnicy (rys. 4) zbudowano model matematyczny, zakładając, że straty mocy w żelazie są równe zero.



Rys. 4. Schemat zastępczy prądnicy z magnesami trwałymi

Na schemacie (rys. 4) oznaczono:

E_1 – siła elektromotoryczna rotacji pochodząca od magnesów trwałych,

f_1 – częstotliwość generowanego napięcia,

R_s – rezystancja fazowa uzwojenia stojana (twornika),

X_r – reaktancja rozproszenia uzwojenia stojana,

U_{10} – napięcie biegu jałowego prądnicy,

Z_{obc} – impedancja obciążenia prądnicy.

Parametry schematu zastępczego maszyny obliczono metodą obwodowo-polową wykorzystując zależności analityczne [6, 7] oraz jej dane konstrukcyjne.

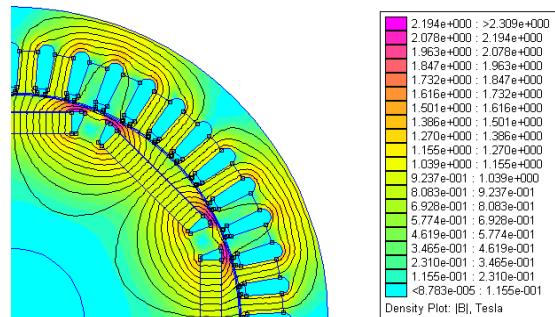
Metodą polową obliczono napięcie rotacji E_1 , natomiast metodą obwodową wyznaczono rezystancje uzwojenia twornika R_s i reaktancje rozproszenia X_r .

Obliczenia napięcia rotacji E_1 przeprowadzono wykorzystując metodę elementów skończonych 2D [5] w programie FEMM i Mathcad.

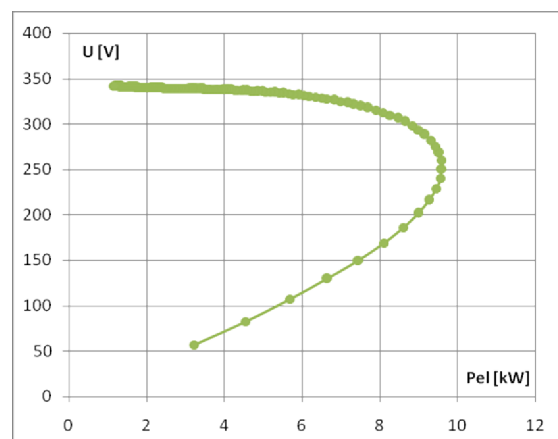
W celach porównawczych reaktancje podłużną i poprzeczną (X_d i X_q) maszyny wyznaczono zarówno polowo jak i analitycznie.

3.1. Analiza polowo-obwodowa

W programie FEMM zamodelowano prądnicę z magnesami trwałymi i wykonano szereg symulacji zmieniając: wielkość szczeliny powietrznej, grubość i szerokość magnesów trwałych. Wyniki obliczeń pozwoliły wybrać jedno z optymalnych rozwiązań obwodu elektromagnetycznego prądnicy.



Rys. 5. Rozkład strumienia magnetycznego prądnicy z magnesami trwałymi



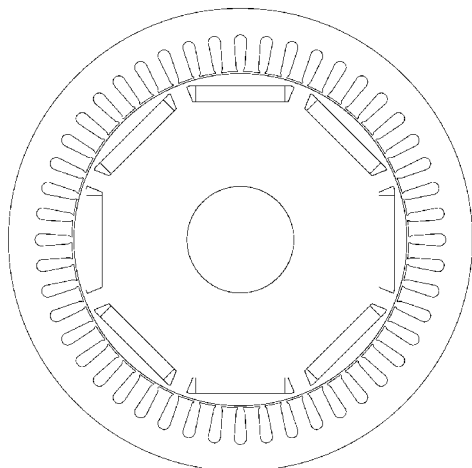
Rys. 6. Charakterystyka zewnętrzna prądnicy wyznaczona metodą polowo-obwodową

Uwzględniając parametry schematu zastępczego (obliczone z danych konstrukcyjnych maszyny) oraz napięcie biegu jałowego (wyznaczone z rozkładu przestrzennego indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej) w progra-

mie Mathcad wykreślono charakterystykę zewnętrzną prądnicy (rys. 6).

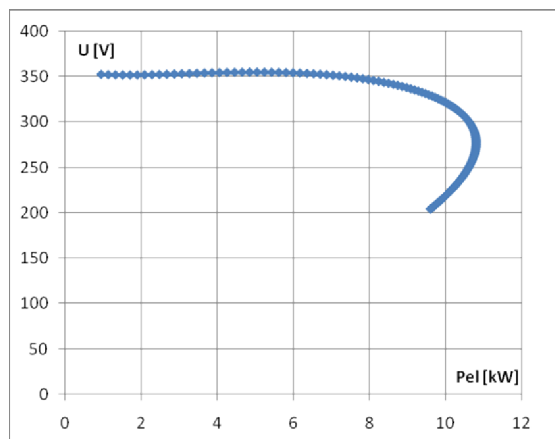
3.2. Obliczenia analityczne prądnicy

Obliczenia analityczne parametrów maszyny wykonano korzystając z programu RMxpert.



Rys. 7. Przekrój poprzeczny modelu maszyny

Obliczenia te pozwoliły na dobór grubości szczeliny powietrznej zapewniający najmniejszą zmienność napięcia. Jednocześnie optymalizowano kąt wypełnienia magnesów tak, aby uzyskać minimalny moment zaczepowy. Przy doborze optymalnej grubości szczeliny powietrznej oraz minimalizacji momentu zaczepowego należało także uwzględnić możliwości technologiczne wykonania modelu fizycznego maszyny.



Rys. 8. Charakterystyka zewnętrzna prądnicy wyznaczona metodą analityczną

4. Wyniki badań laboratoryjnych

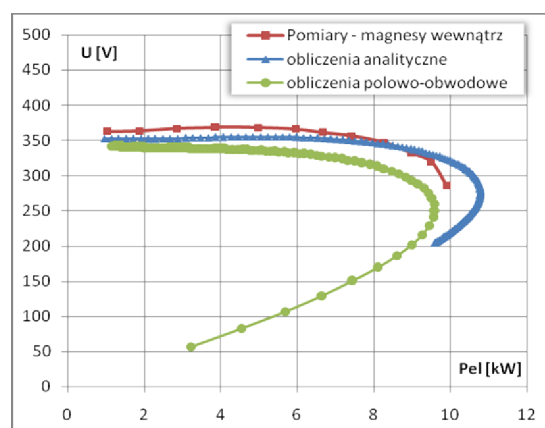
Na podstawie uzyskanych wyników obliczeń przygotowano dokumentację techniczną i wykonano model fizyczny prądnicy. Wirnik prąd-

nicy posiadał dwa rozwiązania rozmieszczenia magnesów trwałych (rys. 1):

- magnesy umieszczone na powierzchni wirnika
- magnesy umieszczone wewnątrz pakietu blach wirnika.

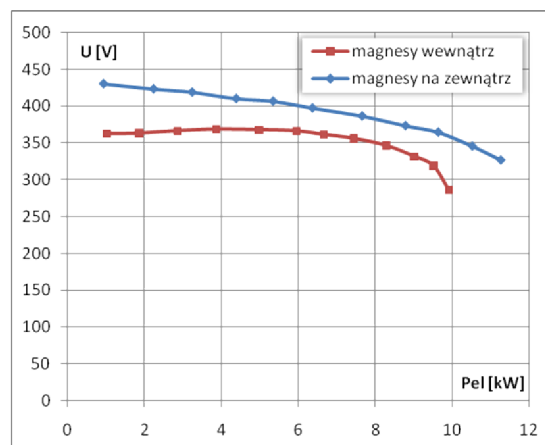
Badania laboratoryjne prototypu wykonanej prądnicy z magnesami trwałymi zostały wykonane dla obu rozwiązań konstrukcyjnych wirnika w celu porównania własności prądnicy.

Na rysunku 9 przedstawiono charakterystykę zewnętrzną prądnicy obliczoną metodą polową, metodą analityczną oraz uzyskaną na podstawie pomiarów dla modelu z wirnikiem, który miał magnesy umieszczone wewnątrz.



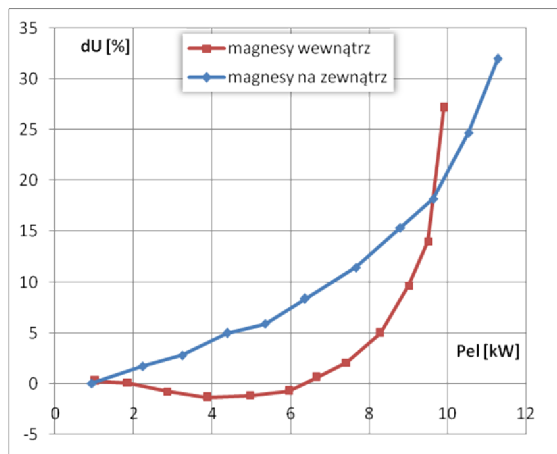
Rys. 9. Charakterystyka zewnętrzna prądnicy obliczona metodą polową, metodą analityczną oraz zmierzona dla $\cos \varphi = 1$ – wirnik z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz

Na rysunku 10 zamieszczono charakterystykę zewnętrzną prądnicy uzyskaną z pomiarów dla dwóch rozpatrywanych rozwiązań konstrukcyjnych wirnika.



Rys. 10. Charakterystyka zewnętrzna prądnicy z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz i z magnesami umieszczonymi na powierzchni wirnika dla $\cos \varphi = 1$

Na rysunku 11 przedstawiono przebieg zmienności napięcia badanej prądnicy z magnesami trwałymi w zależności od mocy. Pomiary wykonano dla obu przypadków umieszczenia magnesów trwałych w wirniku.

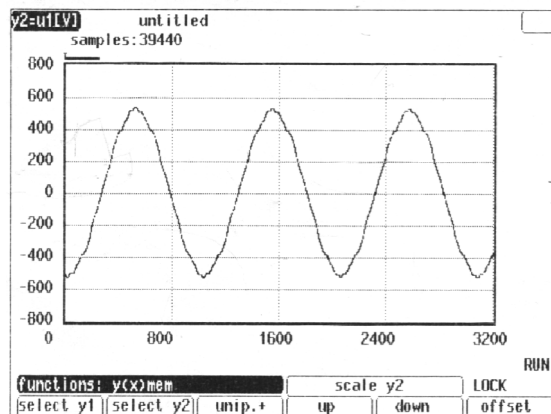


Rys. 11. Przebieg zmienności napięcia prądnicy z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz wirnika i prądnicy z magnesami umieszczonymi na powierzchni wirnika dla $\cos\varphi = 1$ w funkcji mocy obciążenia

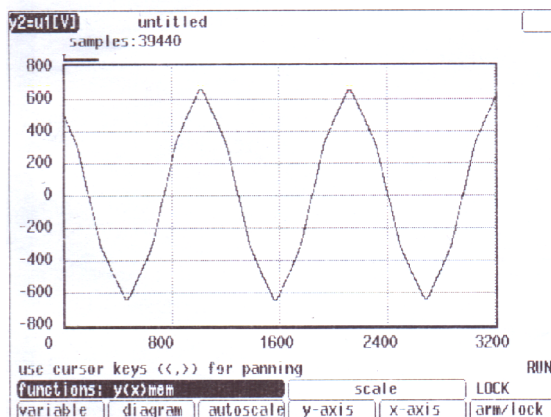
5. Kształt napięcia indukowanego w prądnicy

Napięcie indukowane w prądnicy powinno mieć kształt sinusoidalnych. Dopuszczalny poziom odkształcenia określony jest przez współczynnik THD [8]. Zgodnie z PN [8] wartość współczynnika THD powinna być mniejsza od 8%. W celu określenia stopnia odkształcenia napięcia badanej prądnicy z magnesami trwałymi wykonane zostały pomiary laboratoryjne. Zarejestrowano czasowy przebieg napięcia prądnicy z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz wirnika (rys. 12) oraz z magnesami trwałymi umieszczonymi na zewnętrznej powierzchni wirnika (rys. 13).

Z analizy uzyskanych przebiegów napięć wynika, że dla prądnicy z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz wirnika współczynnik THD jest mniejszy od 3%. W przypadku gdy magnesy umieszczone były na powierzchni wirnika, wartość współczynnika THD wynosiła ok. 4%.



Rys. 12. Czasowy przebieg napięcia indukowanego w prądnicy z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz wirnika



Rys. 13. Czasowy wykres napięcia indukowanego w prądnicy z magnesami trwałymi umieszczonymi na zewnętrznej powierzchni wirnika

6. Podsumowanie i wnioski końcowe

Na podstawie wyników badań laboratoryjnych (rys. 10, 11) można stwierdzić, że prądnica z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz wirnika ma lepsze własności w porównaniu z prądnicą, której wirnik miał magnesy umieszczone na powierzchni. Dla mocy obciążenia zmieniającej się od 1 do 8 kW zmienność napięcia jest mniejsza od 5%, gdy magnesy umieszczone są wewnątrz wirnika. Wyników takich nie da się uzyskać gdy magnesy umieści się na powierzchni wirnika (rys. 11). W tym przypadku zmienność napięcia jest mniejsza od 10 % dla mocy obciążenia od 1 do ok. 7 kW.

Porównując obliczenia teoretyczne z wynikami badań laboratoryjnych prądnicy z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz wirnika (rys. 9) można stwierdzić, że przyjęty algorytm projektowania jest poprawny. Nieznaczne rozbieżności pomiędzy wynikami badań labo-

ratoryjnych a obliczeniami wynikają przede wszystkim:

1. z rozbieżności parametrów magnesów, które w rzeczywistości mogą być inne niż założono w projekcie; wpływa to np. na napięcie biegu jałowego,
2. z temperatury pracy, która ma bardzo duży wpływ na charakterystykę magnesów, a tym samym na parametry zewnętrzne prądnicy,
3. z charakterystyki magnesowania blachy,
4. z dokładności wykonania modelu fizycznego prądnicy, która decyduje o równomierności szczeliny powietrznej.

Pomimo tych rozbieżności cel pracy został osiągnięty. Zmienność napięcia wyjściowego prądnicy, w funkcji mocy obciążenia jest mniejsza od 10% w zakresie mocy 1-9 kW.

Uzyskane rezultaty badań zarówno na podstawie modelu matematycznego jak i dla modelu fizycznego, wykazały, że założone zmiany konstrukcyjne w budowie wirnika były słuszne. Dają możliwość uzyskania odpowiednio małej wartości zmienności napięcia.

Dla obu wykonanych wirnika badanej prądnicy zawartość harmonicznych w napięciu indukowanym, określona współczynnikiem THD, jest dopuszczalna [8]. Kształt napięcia bardziej zbliżony do sinusoidy uzyskuje się, gdy magnesy trwale znajdują się wewnątrz pakietu blach wirnika.

6. Literatura

- [1] Glinka T.: *Autonomiczne elektrownie wiatrowe*. Materiały konferencyjne II Ogólnopolskiej Konferencji ETW 2004, Wyd. Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictw SEP, Warszawa 2004
- [2] Bernatt J.: *Wykorzystanie prądnic synchronicznych do budowy małych elektrowni wiatrowych*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne. Nr 68/2004, Wyd. BOBRME Komel, Katowice 2004
- [3] Glinka T.: *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 2002
- [4] Rossa R., Król E.: *Modern electric machines with permanent magnet*. Przegląd Elektrotechniczny nr 12/2008, ss. 12-17
- [5] THELIN P., SOULARD J., NEE H.P., SARDARANGANI C.: *Comparison between Different Ways to Calculate the Induced No-Load Voltage of PM Synchronous Motors using Finite Element Methods*, PEDS'01, Bali, Indonesia, Oct. 2001
- [6] Jezierski E.: *Maszyny synchroniczne*. Warszawa, PWT 1951
- [7] Głowacki A.: *Obliczenia elektromagnetyczne silników indukcyjnych trójfazowych*. WNT, Warszawa 1993
- [8] PN-EN 50160 *Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych*

Autor

Mgr inż. Stanisław Gawron
 e-mail: s.gawron@komel.katowice.pl
 BOBRME Komel,
 Al. Rozdzieńskiego 188, 40-203 Katowice
 tel. (032) 258-20-41