

Robert Rossa, Tomasz Wolnik
BOBRME KOMEL, Katowice

WERYFIKACJA POPRAWNOŚCI SZYBKIEJ METODY POLOWO-OBWODOWEJ OBLICZANIA CHARAKTERYSTYK OBCIĄŻENIA PRĄDNIC Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

VERIFICATION OF FAST FIELD-CIRCUIT METHOD TO CALCULATE THE LOAD CHARACTERISTICS OF PERMANENT MAGNET GENERATORS

Abstract: The paper deals with the field-circuit method developed for fast computation of load characteristics of stand-alone permanent magnet synchronous generators (PMSGs) with linear R or RL type load. The method is based on the so-called loading method. Load characteristics of chosen PMSG (interior magnets rotor construction) calculated with proposed field-circuit method are shown in the paper and compared to the same characteristics calculated with the use of sophisticated and precise mathematical model of the PMSG based on a two-dimensional transient finite element analysis. Comparison of load characteristics calculated with two different methods shows that the results obtained from the elaborated fast field-circuit calculation algorithm are very close to the results obtained from significantly more time consuming 2D transient method.

1. Wstęp

Prądnice synchroniczne z magnesami trwałymi przeznaczone do odnawialnych źródeł energii o mocach do ok 100 kW, pracują często jako prądnice samotne zasilające odbiorniki liniowe typu R (grzejniki). Kształty charakterystyk obciążenia tych prądnic (ich charakterystyki zewnętrzne), a więc także uzyskiwana moc i sprawność, zależą w głównej mierze od konstrukcji ich wirnika. Dla konstrukcji z magnesami mocowanymi na powierzchni wirnika (ang. Surface Mounted PMSG, SMPMSG) charakterystyki obciążenia $U = f(P_2)$ prądnic pracujących na obciążenie R lub RL są zawsze opadające (zmniejszenie napięcia przy wzroście mocy wydawanej). Dla konstrukcji z magnesami mocowanymi wewnątrz wirnika (ang. Interior PMSG, IPMSG), w których pomiędzy reaktancjami magnesującymi w osi podłużnej i poprzecznej zachodzi zależność: $X_{md} < X_{mq}$, charakterystyki obciążenia $U = f(P_2)$ mają korzystniejszy kształt, tzn. w pewnym, nawet szerokim zakresie mocy wydawanych, charakterystyki te mogą być płaskie lub wznoszące się.

W celu umożliwienia szybkiego projektowania prądnic z magnesami trwałymi dedykowanych do pracy samotnej w odnawialnych źródłach energii o mocy do ok. 100 kW, opracowano algorytm obliczeniowy i zaimplementowano go w programie do szybkich, zautomatyzowanych obliczeń charakterystyk obciążenia metodą polowo-obwodową, z obliczeniami polowymi re-

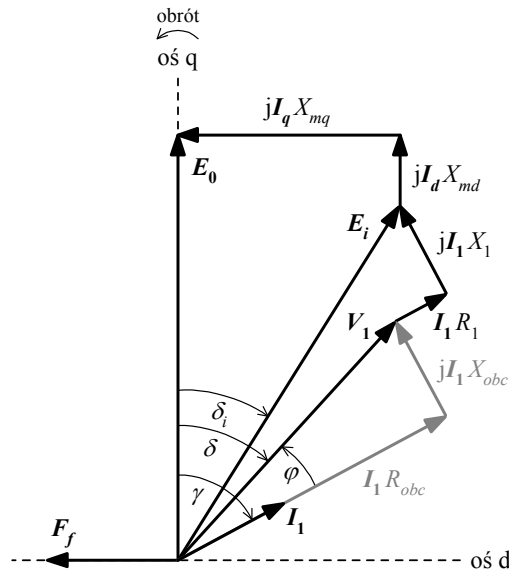
alizowanymi z wykorzystaniem analizy stałoprądowej MES 2D. Szybki algorytm obliczeniowy omówiono pokrótce w kolejnym punkcie artykułu, a następnie uzyskane przy jego pomocy wyniki obliczeń charakterystyk obciążenia dla wybranej prądnicy modelowej zweryfikowano poprzez ich porównanie z wynikami uzyskanymi przy pomocy analizy MES dla stanów przejściowych bazującej na bardzo dokładnym modelu matematycznym tej samej prądnicy.

2. Szybki algorytm obliczania charakterystyk obciążenia prądnic pracujących samotnie na odbiornik R lub RL

Szybki algorytm obliczania charakterystyk obciążenia prądnic synchronicznych z magnesami trwałymi pracujących samotnie na liniowe odbiorniki R lub RL oparto na odpowiednio zaadoptowanej tzw. metodzie polowo-obwodowej obciążeniowej [2], [3]. Charakterystyki obciążenia są w algorytmie obliczane w oparciu o klasyczne równania maszyny synchronicznej, wynikające z jej wykresu wskazowego dla układu współrzędnych $d-q-0$ (rys. 1).

Parametry skupione wykresu wskazowego mające zasadniczy wpływ na charakterystyki obciążenia maszyny: reaktancje magnesujące X_{md} , X_{mq} oraz napięcie E_0 indukowane w fazie uzwojenia twornika przez wirujące magnesy, obliczane są oddzielnie dla każdego z analizowanych punktów pracy prądnicy z wykorzystaniem stałoprą-

dowej analizy MES 2D rozkładu strumienia magnetycznego w maszynie. Przy obliczaniu w/w parametrów skupionych uwzględniana jest ich zależność od aktualnego poziomu nasycenia w rdzeniu magnetycznym maszyny, który zależy z kolei od aktualnego obciążenia (punktu pracy) maszyny synchronicznej.

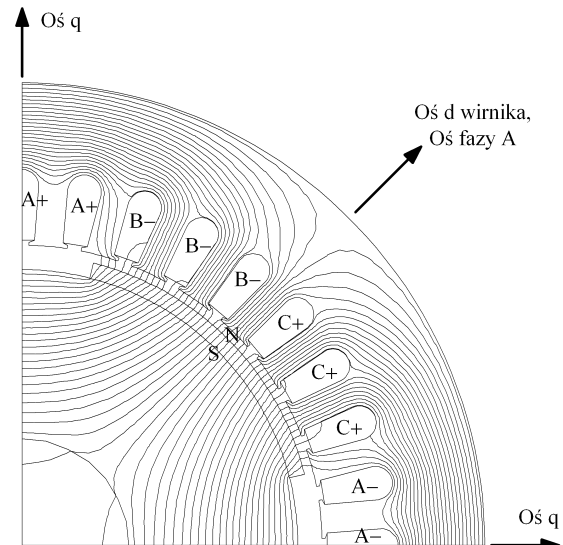


Rys. 1. Wykres wskazowy prądnicy synchronicznej z magnesami trwałymi do analizy pracy samotnej na odbiornik R lub RL

Idea szybkiego algorytmu obliczeniowego (rys. 3) opiera się na możliwości obliczenia oddzielnie dla każdego punktu pracy prądnicy, przy wykorzystaniu odpowiednio przygotowanego modelu 2D MES prądnicy (rys. 2) z właściwie zdefiniowanymi wymuszeniami prądowymi (innymi dla każdego punktu pracy), następujących wielkości występujących na wykresie wskazowym:

- modułu Φ wektora wypadkowego strumienia głównego Φ w szczelinie powietrznej;
- modułu E_i wskazu napięcia szczelinowego E_i ;
- kąta fazowego δ_i wskazu E_i .

Powyższe wielkości obliczane są dla każdego punktu pracy z uwzględnieniem specyficznego dla tego punktu rozkładu pola elektromagnetycznego w prądnicę. Dla ustalonego z góry współczynnika mocy odbiornika $\cos\varphi$, punkt pracy określony jest przez wartości modułu I_1 i kąta fazowego γ wskazu prądu obciążenia I_1 (rys. 1), które to wielkości przeliczane są odpowiednio na prądy fazowe w uzwojeniu twornika i zadawane w modelu 2D MES prądnicy.



Rys. 2. Model MES prądnicy SMPMSG przygotowany wg wymagań metody połowo-obwodowej obciążeniowej. Rozkład strumienia magnetycznego odpowiada pracy na biegu jałowym

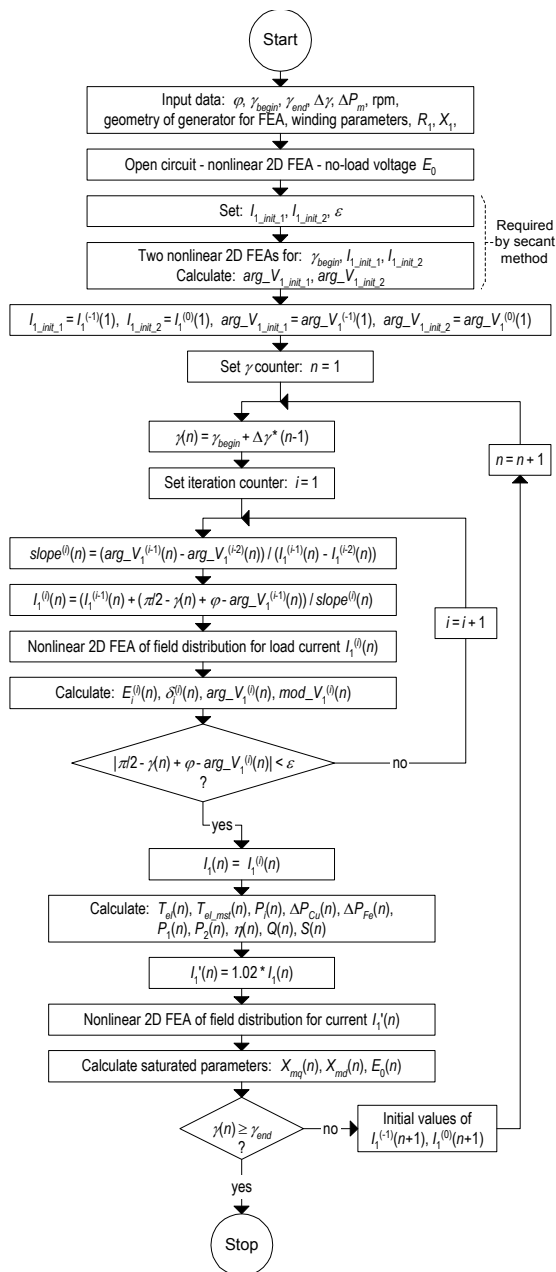
W algorytmie obliczeniowym (rys. 3) założono, że wielkościami zadawanymi przy poszukiwaniu rozwiązania równań wynikających z wykresu wskazowego prądnicy pracującej samotnie na odbiornik R lub RL są:

- zakres kątów fazowych $\gamma_{begin} \div \gamma_{end}$ wskazu prądu I_1 , odpowiadający pełnemu zakresowi prądów obciążenia prądnicy;
- współczynnik mocy obciążenia $\cos\varphi$, stały w całym zakresie prądów obciążenia.

W algorytmie założono także, że wszystkie zależności matematyczne opisujące pracę samotną prądnicy na odbiornik R lub RL są, dla zadanych γ i $\cos\varphi$, spełnione jednocześnie tylko przez jedną wartość modułu I_1 prądu fazowego, tzn. wzrostowi kąta γ odpowiada wzrost modułu I_1 . Właściwa wartość modułu I_1 nie jest początkowo znana i jest znajdowana iteracyjnie. Obliczenia iteracyjne zrealizowano w algorytmie z zastosowaniem tzw. metody siecznych.

3. Weryfikacja algorytmu obliczeniowego z wykorzystaniem złożonego modelu matematycznego do analizy MES dla stanów przejściowych

Poprawność algorytmu z rys. 3 zweryfikowano przez porównanie obliczonych z jego pomocą charakterystyk obciążenia wybranej prądnicy modelowej z tymi samymi charakterystykami obliczonymi z wykorzystaniem złożonej analizy MES 2D dla stanów przejściowych.

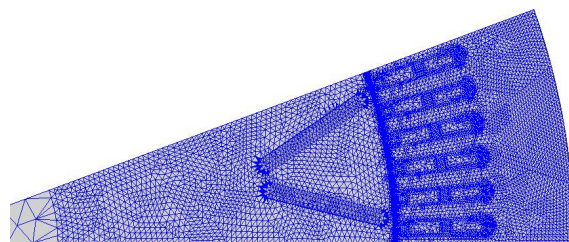


Rys. 3. Algorytm obliczania charakterystyk obciążenia prądnic pracujących samotnie na odbiorniki typu R, RL. Górne indeksy i oznaczają kolejne iteracje prądowe metodą siecznych, n oznacza kolejne wartości kąta γ z zakresu $\gamma_{begin} \div \gamma_{end}$

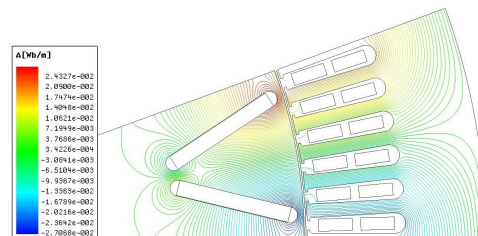
Obliczenia obiema metodami przeprowadzono dla modelowej prądnicy o konstrukcji IPMSG, wzniosie osi wału $H = 355 \text{ mm}$, liczbie biegunów magnetycznych $2p = 18$, prędkości znamionowej $n_N = 333.3 \text{ min}^{-1}$, mocy znamionowej $P_N = 75 \text{ kW}$. Jest to prądnica z magnesami trwałymi każdego bieguna magnetycznego wirnika ułożonymi w kształcie litery „V”.

Obliczenia charakterystyk obciążenia z wykorzystaniem analizy MES dla stanów przejściowych przeprowadzono na modelu prądnicy obejmującym jeden biegun magnetyczny. Model ten, wraz z siatką elementów skończonych pokazano na rys. 4.

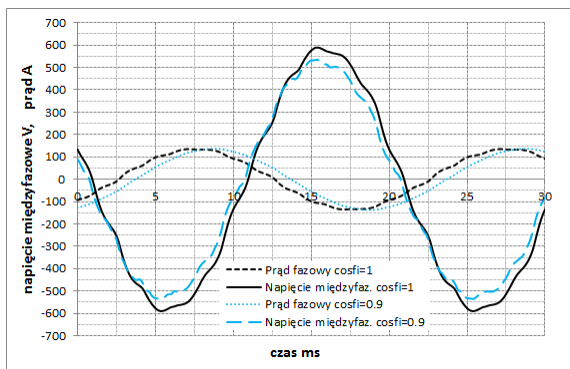
Weryfikacyjne obliczenia charakterystyk obciążenia przeprowadzono dla trzech wartości współczynników mocy obciążenia, $\cos\varphi = 0.8, 0.9$ oraz 1. Wartość oraz charakter obciążenia prądnicy zadawany był w modelu MES 2D dla stanów przejściowych parametrycznie, poprzez krokową zmianę rezystancji obciążenia i odpowiednią zmianę indukcyjności obciążenia, tak by utrzymać każdorazowo zadaną wartość $\cos\varphi$. Po obliczeniu kilku okresów przebiegów czasowych napięć na zaciskach prądnicy, prądów fazowych oraz momentu elektromagnetycznego, obliczane były następnie pozostałe parametry prądnicy: moc mechaniczna na wale P_1 , moc czynna wydawana P_2 , sprawność η . Model matematyczny do analizy MES dla stanów przejściowych umożliwiał bezpośrednie obliczanie strat w pakiecie blach prądnicy w każdym kroku czasowym. Do określenia charakterystyk obciążenia prądnicy obliczane były wartości uśrednione za okres elektryczny momentu elektromagnetycznego T_e i strat w pakiecie blach ΔP_{Fe} oraz wartości skuteczne prądów fazowych i napięć na zaciskach.



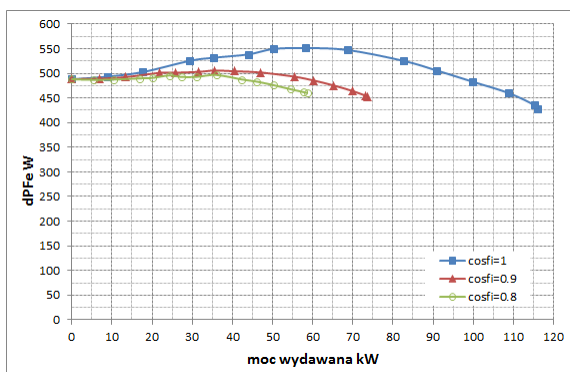
Rys. 4. Model obwodu elektromagnetycznego prądnicy IPMSG (przekrój jednego bieguna)



Rys. 5. Linie ekwipotencjalne potencjału magnetycznego w IPMSG dla pracy na biegu jałowym, wynik z analizy MES dla stanów przejściowych



Rys. 6. Obliczone przebiegi czasowe wybranych prądów fazowych i napięć międzyfazowych na zaciskach prądnicy dla $\cos\varphi = 0.9$ i 1

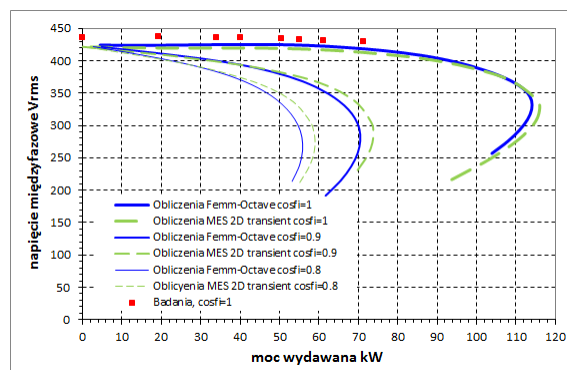


Rys. 7. Straty w rdzeniu prądnicy ΔP_{Fe} w zależności od mocy wydawanej, otrzymane z analizy MES dla stanów przejściowych przy różnych $\cos\varphi$

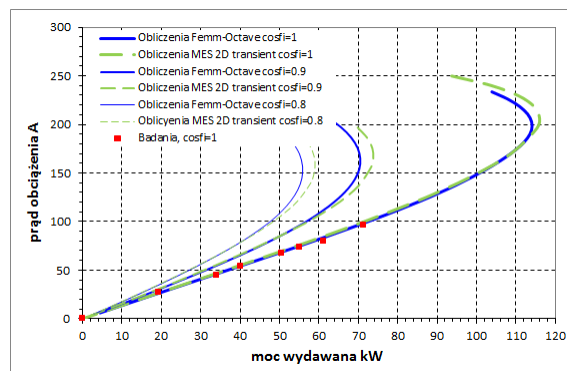
4. Wnioski

Przedstawione na rys. 8 i 9 porównanie charakterystyk obciążenia $U = f(P_2)$ oraz $I_1 = f(P_2)$ modelowego generatora IPMSG pracującego samotnie na odbiornik R lub RL, obliczonych opracowaną metodą polowo-obwodową oraz z wykorzystaniem analizy MES dla stanów przejściowych, wykazuje bardzo dobrą zgodność wyników obu metod dla szerokiego zakresu obciążeń mocą P_2 . Jedyne przy obciążeniach bliskich mocy maksymalnej P_2 dla danego $\cos\varphi$ uwidaczniają się różnice wyników obliczeń. Obliczone różnice mocy maksymalnych P_2 przy różnych $\cos\varphi$ nie przekraczają 5.5%. Przyczyny tych różnic będą przedmiotem dalszych prac nad opracowanym algorytmem polowo-obwodowym. Zaletą tego algorytmu jest krótki czas obliczeń charakterystyk obciążenia, który dla jednej wartości $\cos\varphi$ nie przekracza 15 min, natomiast obliczenie tych samych charakterystyk z pomocą analizy MES dla stanów przejściowych zajmowało ok. 8 godz. (analizowano tą samą liczbę

punktów na charakterystykach, dla każdego punktu obliczono dwa okresy elektryczne przebiegów czasowych).



Rys. 8. Obliczone charakterystyki $U = f(P_2)$, porównanie wyników dwóch metod obliczeniowych



Rys. 9. Obliczone charakterystyki $I_1 = f(P_2)$, porównanie wyników dwóch metod obliczeniowych

Literatura

- [1]. Rahman M. A., Zhou P., *Determination of Saturated Parameters of PM Motors Using Loading Magnetic Fields*, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-27, No. 5, pp. 3947-3950, Sep. 1991.
- [2]. Rahman M. A., Zhou P., *Field-Based Analysis for Permanent Magnet Motors*, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-30, No. 5, pp. 3664-3667, Sep. 1994.
- [3]. Rahman M. A., Zhou P., Jabbar M.A., *Field Circuit Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motors*, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-30, No. 4, pp. 1350-1359, July 1994.
- [4]. Rossa R., Król E., *Metoda obwodowo-polowa obliczania charakterystyk zewnętrznych prądnic synchronicznych z magnesami trwałymi pracujących samotnie na odbiorniki typu R lub RL*, Zeszyty Problemowe-Maszyny Elektryczne, nr 80/2008, str. 175-179, BOBRME KOMEL.