

Mariusz Barański

Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej

ANALIZA ZJAWISKA WYPIERANIA PRĄDU W SILNIKU INDUKCYJNYM PRACUJĄCYM W TEMPERATURZE KRIOGENICZNEJ

ANALYSIS OF CURRENT DISPLACEMENT PHENOMENA IN A SQUIRREL CAGE MOTOR WORKING AT CRYOGENIC TEMPERATURE

Streszczenie: W artykule przedstawiono polowy algorytm analizy sprzężonych zjawisk elektromagnetycznych, cieplnych i mechanicznych w silniku indukcyjnym. W rozważaniach uwzględniono skos żłobków, nasycanie się ferromagnetyka oraz wpływ temperatury na właściwości elektryczne, cieplne i magnetyczne materiałów. Opracowany na jego podstawie program obliczeniowy wykorzystano do analizy zjawiska wypierania prądu w prętach uzwojenia klatkowego wysokonapięciowego silnika indukcyjnego pracującego w warunkach kriogenicznych. Przedstawiono wybrane rezultaty badań oraz wynikające z nich wnioski.

Abstract: The paper presents an algorithm for transient FE analysis of coupled electromagnetic-thermal phenomena in a squirrel cage submerged motor working at cryogenic temperature. The non-linearity of the magnetic circuit, the movement of the rotor, skewed slots, and the influence of temperature on electric and thermal properties of the materials has been taken into account. Developed on the basis of presented algorithm a computer program used to analyze the phenomenon of current displacement in the rotor bars of high-voltage cage induction motor working in cryogenic. The results of the simulations are presented.

Słowa kluczowe: wysokonapięciowy silnik klatkowy, temperatura kriogeniczna, wypieranie prądu, analiza

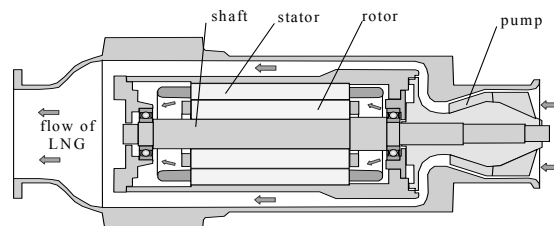
Keywords: FE analysis of submerged induction motor, cryogenic temperature, coupled electromagnetic-thermal phenomena, current displacement

1. Wstęp

Wnikliwa analiza stanów nieustalonych zjawisk sprzężonych jest niezbędna do doskonalenia metod projektowania silników indukcyjnych. Wiarygodność obliczeń projektowych zależy przede wszystkim od dokładności, z jaką stosowany model matematyczny odwzorowuje zjawiska w rozpatrywanym silniku. Zatem, w rozważaniach dąży się do kompleksowego uwzględnienia wpływu na przebieg zjawisk: ruchu wirnika, nieliniowych właściwości materiałów magnetycznych, zależności konduktywności elektrycznej, przewodność cieplnej i reluktywności magnetycznej materiałów od temperatury, prądów wirowych indukowanych w masywnych elementach przewodzących, zasilania napięciem odkształconym czy skosu żłobków [1, 2]. Podejście takie jest ważne szczególnie, gdy analizujemy lub projektujemy specjalne maszyny elektryczne jak np. silnik klatkowy pracujący w warunkach kriogenicznych [1]. Dlatego też zaprezentowany przez autora model polowy nieustalonych zjawisk sprzężonych w silniku indukcyjnym obejmuje równania

opisujące pole elektromagnetyczne, równanie ruchu wirnika oraz pole temperatury [1, 2, 3].

Na rys. 1 pokazano przekrój układu złożonego z silnika i pompy. Rozpatrywany wysokonapięciowy czterobiegunowy silnik indukcyjny klatkowy o następujących parametrach znamionowych: $U_N = 6600$ V, $f = 60$ Hz, $P_N = 785$ kW, jest przeznaczony do pracy w ciekłym gazie ziemnym. Silnik ma napędzać, osadzoną na jego wale, pompę ciekłego gazu ziemnego. Podczas pracy silnika wirnik, stojan oraz uzwojenia są całkowicie zanurzone w ciekłym gazie ziemnym i pracują w temperaturze -161°C . Projekt ten był realizowany w ramach 6 Programu Ramowego finansowanego ze środków Unii Europejskiej.



Rys. 1. Układ złożony z wysokonapięciowego silnika klatkowego z pompą

Ciekły gaz przepływa wzdłuż zewnętrznej powierzchni korpusu, w którym osadzony jest rdzeń stojana oraz przez szczelinę między stojanem a wirnikiem. Prezentowany zestaw silnik – pompa jest przeznaczony do wypompowywania ciekłego gazu ziemnego z ładowni tankowca. Ze względu na bardzo dobre chłodzenie silnika znamionowa gęstość prądu w uzwojeniach jest kilka razy większa od gęstości prądu występujących w silnikach chłodzonych powietrzem, a masa jego obwodu elektromagnetycznego jest ok. dwukrotnie mniejsza od silników klasycznych o tej samej mocy. Pomimo iż, silnik pracuje zanurzony w temperaturze ciekłego gazu ziemnego nie występuje w nim zjawisko nadprzewodnictwa.

2. Model matematyczny

Dwuwymiarowy model matematyczny zjawisk sprzężonych wysokonapięciowego silnika indukcyjnego klatkowego zawiera równania opisujące rozkład pola magnetycznego i prądy w uzwojeniach (1), równanie dynamiki (3) oraz równanie temperaturowe (2) [1, 2]. Model matematyczny uwzględnia skos żłobków wirnika. Do uwzględnienia skosu żłobków zaproponowano model warstwowy maszyny elektrycznej [4, 5]. W modelu tym zastępuje się układ ze żłobkami skoszonymi układem o żłobkach skoszonych schodkowo. Schodki tworzone są z warstw rdzenia w przesuniętych względem siebie w kierunku obwodowym o fragment podziałki żłobkowej. Przyjmuje się, że w obrębie warstwy żłobki są proste.

$$\begin{bmatrix} [\mathbf{S}_w^n + \mathbf{G}_w(1 - \mathbf{C}_{kw})\Delta t^{-1}] & -[\mathbf{z}_w] \\ -[\mathbf{z}_w^T] & -(\mathbf{R}\Delta t + \mathbf{L}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\boldsymbol{\Phi}_w^n] \\ \mathbf{i}^n \end{bmatrix} \quad (1),$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\Delta t \mathbf{U}^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{G}_w(1 - \mathbf{C}_{kw})\Delta t^{-1}] & \mathbf{0} \\ -[\mathbf{z}_w^T] & -\mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\boldsymbol{\Phi}_w^{n-1}] \\ \mathbf{i}^{n-1} \end{bmatrix}$$

$$(\mathbf{S}_\theta^n + \mathbf{K}_{\theta b}^n + \mathbf{G}_\theta^n \Delta t^{-1}) \boldsymbol{\theta}^n = \mathbf{F}_\theta \mathbf{P}^n + \mathbf{K}_{\theta b}^n + \mathbf{G}_\theta^n \Delta t^{-1} \boldsymbol{\theta}^{n-1} \quad (2),$$

$$J_b(\alpha_{n+1} - 2\alpha_n + \alpha_{n-1})/(\Delta t)^2 = T_n - T_{n0}, \quad (3)$$

gdzie: n oznacza kroku czasowego; Δt - długość kroku czasowego; \mathbf{U} - wektor napięć zasilających; \mathbf{i} - wektor prądów oczkowych; $\boldsymbol{\Phi}$ - wektor potencjałów krawędziowych, \mathbf{S}_w^n , \mathbf{G}_w , \mathbf{C}_{kw} , \mathbf{z}_w - macierze odpowiednio reluktancji, konduktancji, współczynników oraz transformująca macierz prądów krawędziowych na oczkowe podmacierze dla odpowiednich podziałów dysku; \mathbf{R} - macierz diagonalna rezystancji uzwojenia stojana; \mathbf{L} - macierz indukcyjności połączeń

czołowych; \mathbf{P} - wektor źródeł ciepła; $\boldsymbol{\theta}$ - wektor poszukiwanych temperatur; \mathbf{S}_θ^n , \mathbf{G}_θ^n , $\mathbf{K}_{\theta b}^n$, $\mathbf{K}_{\theta b}^n$, \mathbf{F}_θ^n - odpowiednio macierze przewodności cieplnej, pojemności cieplnej, oraz opisujące transport ciepła do otoczenia; J_b - moment bezwładności; α - położenie kątowne wirnika; T_0 - moment obciążenia; T_n - moment elektromagnetyczny obliczany na podstawie rozkładu pola magnetycznego [6].

W rozpatrywanym modelu zjawisk sprzężonych wysokonapięciowego silnika klatkowego elementy macierzy \mathbf{S}_w^n są funkcją przenikalności magnetycznej materiałów μ , która z kolei zależy od rozkładu pola magnetycznego i temperatury. Natomiast rezystancja uzwojeń stojana \mathbf{R} oraz elementy macierz \mathbf{G}_w są funkcją temperatury, tj., $\mathbf{R} = \mathbf{R}(\boldsymbol{\theta})$, $\mathbf{G}_w = \mathbf{G}_w(\boldsymbol{\theta})$. W rozważaniach przyjęto, że są trzy źródła ciepła w silniku: (a) straty w uzwojeniach, (b) prądy wirowe w litych elementach oraz (c) straty w rdzeniu. Straty (a) i (b) są określane na podstawie rozkładu gęstości prądu z równania (1). Straty (c) są obliczane na podstawie ogólnie znanej zależności [7].

3. Implementacja numeryczna

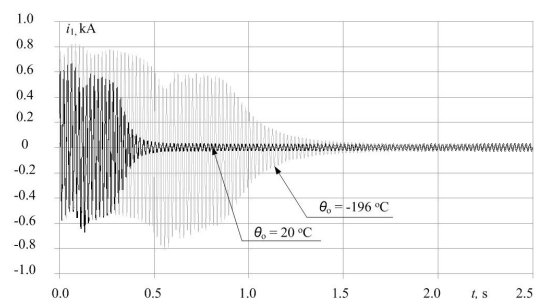
Ze względu na sprzężenia występujące pomiędzy wielkościami elektrycznymi, mechanicznymi i cieplnymi równania (1) – (3) są rozwiązywane jednocześnie. Nieliniowa zależność parametrów opisujących właściwości materiałów od wyznaczanych wielkości polowych komplikuje dodatkowo algorytm rozwiązywania równań modelu zjawisk sprzężonych. Rozwiązanie jednego układu nieliniowych równań algebraicznych zawierającego od kilkudziesięciu do kilkuset tysięcy równań jest złożone i czasochłonne. Nastęrcza ono wiele problemów natury numerycznej, programowej oraz sprzętowej. Do rozwiązywania równań można wykorzystać typowe metody iteracyjne. Są jednak one dla tego typu problemów zazwyczaj mało efektywne. Z powyższych względów do rozwiązania układu złożonego z równań (1) – (3) autor zaproponował metodę relaksacji blokowej. Zaletą metody relaksacji blokowej jest możliwość wykorzystania klasycznej efektywnej procedury Newtona-Raphsona do niezależnego iteracyjnego rozwiązania nieliniowych równań (bloków) opisujących zjawiska elektromagnetyczne i cieplne [8]. Do

rozwiązywania równań opisujących rozkład pola elektromagnetycznego wykorzystano metodę elementów skończonych krawędziowych i węzłowych. Do odwzorowania ruchu wirnika zastosowano metodę elementów odkształczanych [9]. Moment elektromagnetyczny wyznaczono podstawie tensora naprężeń powierzchniowych Maxwella [6].

4. Rezultaty badań symulacyjnych

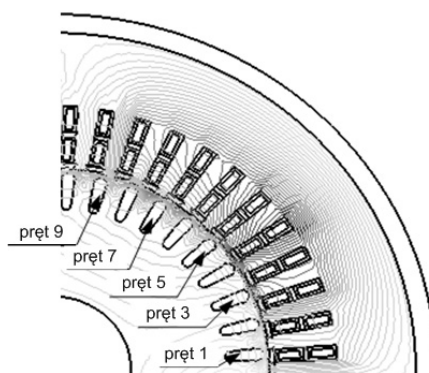
Na podstawie przedstawionego algorytmu rozwiązywania równań modelu dyskretnego zjawisk, opracowano program komputerowy do symulacji stanów pracy i analizy zjawisk sprzężonych w silnikach indukcyjnych klatkowych. Program komputerowy wykorzystano do analizy zjawiska wypierania prądu w prętach uzwojenia klatkowego wysokonapięciowego silnika indukcyjnego pracującego w warunkach kriogenicznych. Obliczenia wykonano dla temperatury otoczenia równej $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ i temperatury kriogenicznej $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. W celu jak najdokładniejszego odwzorowania w programie obliczeniowych parametrów materiałowych, autor pracy dodatkowo wyznaczył pomiarowo charakterystykę $B(H)$ klina magnetycznego [10] i wykorzystał ją przy symulacji stanów pracy. W rozważaniach uwzględniono również wpływ temperatury na konduktywność elektryczną materiałów. Przyjęto, że wyznaczony z pomiarów moment oporowy T_i przy pracy silnika w powietrzu (w temperaturze otoczenia) i w ciekłym gazie (w temperaturze kriogenicznej), wynosił odpowiednio 6,5 oraz 31,4 Nm [1]. Tak duży moment oporowy przy pracy z ciekłym azotem wynika z dużego tarcia wirnika o wypełniający maszynę płynny gaz.

Przeprowadzono rozruch nieobciążonego wysokonapięciowego silnika kriogenicznego zasilanego napięciem 5240 V. Obliczone przebiegi prądu i_1 w temperaturze otoczenia równej $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ zamieszczono na rys.2. Założono, że temperatura wszystkich podzespołów silnika jest równa temperaturze otoczenia. Z uzyskanych przebiegów wynika, że stan przejściowy spowodowany rozruchem w temperaturze kriogenicznej wynosi ok. 1,5 s i jest 3 krotnie dłuższy niż dla rozruchu przeprowadzonego przy temperaturze podzespołów $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.



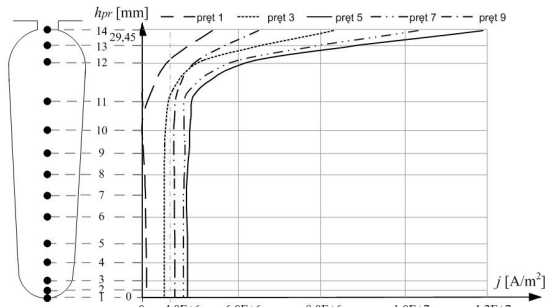
Rys. 2. Przebieg prądu i_1 podczas rozruchu silnika wysokonapięciowego przeprowadzonego w temperaturze $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$

Obliczone rozkłady gęstości prądu na osi pręta wirnika wzdłuż jego wysokości dla chwili $t = 0,5\text{ s}$ otrzymane dla temperatury otoczenia pokazano na rys. 4, natomiast dla temperatury kriogenicznej na rys. 5. Rozkład gęstości prądu przedstawiono dla kilku wybranych prętów wirnika – rys. 3. Z uwagi na osiowosymetryczny model analizowanego silnika w pracy rozpatrzono $1/4$ części silnika.

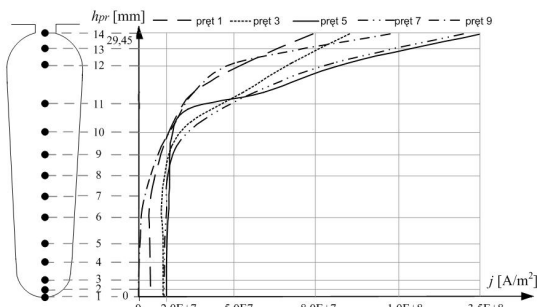


Rys. 3. Położenie rozpatrywanych prętów wirnika

Na rys. 4-5 można zaobserwować bardzo silne wypieranie prądu. Widać również, że na rozkład gęstości prądu wpływa położenie pręta względem zębów stojana. Stosunek k gęstości prądu w górnej części żłobka do jego gęstości w części dolnej dla temperatury $\theta_o = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ wynosi $k_{20} = 6,4$, a dla temperatury $\theta_o = -196\text{ }^{\circ}\text{C}$, $k_{-196} = 11,7$. Tak duże wypieranie prądu w pręcie jest spowodowane dużą konduktywnością aluminium w temperaturze kriogenicznej. Ze względu na dużą gęstość prądu bardziej nagrzewają się podobszary pręta znajdujące się w górnej jego części. Z kolei rozkład temperatury wpływa na rozkład konduktywności σ aluminium wzdłuż wysokości pręta [1].



Rys. 4. Rozkład gęstości prądu j wzdłuż wysokości pręta podczas rozruchu silnika wysokonapięciowego dla chwili $t = 0,5$ s;
 $U_s = 5240$ V; $\theta_o = 20$ °C



Rys. 5.4. Rozkład gęstości prądu j wzdłuż wysokości pręta podczas rozruchu silnika wysokonapięciowego dla chwili $t = 0,5$ s;
 $U_s = 5240$ V; $\theta_o = -196$ °C

5. Podsumowanie

Przedstawiony w pracy połowy algorytm zjawisk sprzężonych może być z powodzeniem stosowany do analizy stanów nieustalonych w maszynach indukcyjnych klatkowych. Warto zauważyć, wpływ położenia pręta wirnika na rozkład gęstości prądu. Rozpatrywanie rozkładu gęstości prądu w dowolnym przecie wirnika sugeruje, że we wszystkich prętach rozkłady są takie same. Takie podejście jest słuszne, gdy jest ono konsekwencją zastosowania uproszczeń w modelu matematycznym rozpatrywanego obiektu lub skoncentrowaniu się na rozkładzie gęstości prądu w specjalnie wybranym, specyficznym usytuowanym przecie. Przeprowadzone badania potwierdziły, że temperatura wpływa zarówno na przebieg stanu elektromagnetycznie nieustalonego, jak i na amplitudy prądów oraz momentu elektromagnetycznego po jego zaniku. Największy wpływ temperatury na przebieg zjawisk elektromagnetycznych zaobserwowano w prętach uzwojenia klatkowego silnika pracującego w warunkach kriogenicznych. Jest to spowodowane kumulacją czynników sprzyjających

wypieraniu prądu w przecie, tj. dużą jego wysokością i prawie ośmiokrotnie mniejszą niż przy pracy w temperaturze pokojowej rezystywnością materiałów przewodzących.

6. Literatura

- [1]. Barański. M., Szelaż W.: *Finite element analysis of transient electromagnetic-thermal phenomena in a squirrel cage motor working at cryogenic temperature*, IET Science Measurement and Technology, Vol. 6, No 5, pp 1-7, 2012,
- [2]. Barański M., Demenko A., Łyskawiński W., Szelaż W.: *Finite element analysis of transient electromagnetic-thermal phenomena in a squirrel cage motor*, COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 30, No. 3, pp 832 – 840, 2011.
- [3]. Kolondzovski Z., Belahcen A., Arkkio A.: *Multiphysics thermal design of a high-speed permanent-magnet machine*, Appl. Therm. Eng., Vol. 29, No 13, pp. 2693–2700, 2009.
- [4]. Piriou F., Razek A.: *Model for coupled magnetic-electric circuits in electric machines with skewed slots*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 26, No. 2, pp.1096-1100, 1990.
- [5]. Ho, S.L., Fu, W.N. : *A comprehensive approach to the solution of direct-coupled multislice model of skewed rotor induction motors using time-stepping eddy-current finite element method*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, No. 3, pp. 2265 - 2273, 1997.
- [6]. Demenko A.: *Movement simulation in finite element analysis of electric machine dynamics*, IEE Trans. On Magn., Vol. 32, No 3, pp. 1553-1556, 1996.
- [7]. Driesen J.: *Coupled electromagnetic-thermal problems in electrical energy transducers*, PhD Thesis, Faculty of Applied Science, K.U. Leuven, 2000.
- [8]. Driesen J., Hameyer K.: *Newton and quasi-Newton algorithms for non-linear electromagnetic-thermal coupled problems*, Compel, Vol. 21, No 1, pp. 116-125, 2002.
- [9]. Demenko A.: *Symulacja dynamicznych stanów pracy maszyn elektrycznych w ujęciu polowym*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1997.
- [10]. Barański, M.: *Influence of the magnetic wedge materials on characteristics of 3-phase high voltage induction motor*, Arch. Electr. Eng., Vol.56, No 2, pp. 173–182, 2007.

Autorzy

dr inż. Mariusz Barański, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-96 Poznań, E-mail: mariusz.baranski@put.poznan.pl

Recenzent

prof. dr hab. inż. Bronisław Tomczuk