

Andrzej BOBON
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
Politechniki Śląskiej

METODA POŁOWO-OBWODOWA WYZNACZANIA PARAMETRÓW I CHARAKTERYSTYK MASZyny SYNCHRONICZNEJ W USTALONYM STANIE OBCIĄŻENIA

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę wyznaczania parametrów i charakterystyk maszyny synchronicznej w dowolnym ustalonym stanie obciążenia przy wykorzystaniu modelu połowo-obwodowego maszyny. Metoda polega na iteracyjnym rozwiązywaniu równań obwodów elektrycznych uzwojeń i równań opisujących rozkład przestrzenny pola magnetycznego w przekroju poprzecznym maszyny. Wyniki obliczeń podano dla turbogenerатора TWW-200-2 o mocy 200 MW.

FIELD-CIRCUIT METHOD OF DETERMINING OF SYNCHRONOUS MACHINE PARAMETERS AND CHARACTERISTICS IN STEADY-STATE LOAD OPERATION CONDITIONS

Summary. A method for the determination of synchronous machine parameters and characteristics in any steady-state condition is presented in the paper using a field-circuit model of the machine. The method consists in iterative solving of the both winding electric circuit equations and equations describing spatial magnetic field distribution in the machine cross section. Results of calculations for the 200 MW turbogenerator are presented, as well.

1. WPROWADZENIE

Podstawową trudnością przy wyznaczaniu parametrów i wielkości elektromagnetycznych maszyny synchronicznej (np. indukcyjności, prądów w uzwojeniach, strumieni magnetycznych) pracującej w symetrycznym stanie ustalonego obciążenia i w określonych warunkach zasilania, jest uwzględnienie nieliniowych zjawisk związanych z nasyceniem się rdzeni ferromagnetycznych maszyny.

Indukcyjności występujące w klasycznych równaniach opisujących stan ustalony maszyny są nieliniowymi funkcjami stopnia nasycenia rdzeni magnetycznych, który zmienia się przy zmianie obciążenia lub zmianie warunków zasilania maszyny. W dokładnych obliczeniach wielkości charakteryzujących stan obciążenia maszyny, w szczególności zaś w

obliczeniach charakterystyk stanu ustalonego, indukcyjności maszyny nie są znane a priori, przez co klasyczne równania wykorzystywane w takich obliczeniach są niewystarczające.

Powyższy problem komplikuje ponadto zjawisko wzajemnego sprzężenia magnetycznego między wielkościami w osi podłużnej d i poprzecznej q , występujące w stanie nasycenia obwodu magnetycznego maszyny.

W pracy przedstawiono metodę obliczania parametrów i wielkości elektromagnetycznych maszyny synchronicznej w dowolnym, ustalonym stanie obciążenia, przy wykorzystaniu modelu połowo-obwodowego. Model połowo-obwodowy tworzą równania napięciowo-prądowe obwodów elektrycznych uzwojeń maszyny i równania opisujące rozkład pola magnetycznego w maszynie. Równania te są ze sobą wzajemnie powiązane. Żeby rozwiązać równania pola magnetycznego muszą być znane prądy w uzwojeniach. Prądy w uzwojeniach mogą być obliczone z równań obwodowych pod warunkiem znajomości indukcyjności uzwojeń, które z kolei zależą od rozkładu pola magnetycznego. Dlatego obydwa układy równań muszą być rozwiązywane jednocześnie, albo w pętli iteracyjnej przy założeniu początkowych wartości indukcyjności.

Na tej podstawie opracowano algorytm i program komputerowy umożliwiający obliczanie wielkości elektromagnetycznych i charakterystyk w dowolnych ustalonych warunkach zasilania i obciążenia maszyny synchronicznej. W obliczeniach rozkładu pola magnetycznego wykorzystano program metody elementów skończonych Opera-2D.

Zaletą prezentowanej metody jest możliwość wyznaczenia rozkładu pola magnetycznego, indukcyjności oraz wszystkich wielkości elektromagnetycznych maszyny synchronicznej przy uwzględnieniu rzeczywistej struktury i rzeczywistych charakterystyk obwodu magnetycznego. Obliczenia są jednak czasochłonne i wymagają specjalistycznego oprogramowania.

2. MODEL POŁOWO-OBWODOWY MASZYNY SYNCHRONICZNEJ

Model połowo-obwodowy maszyny synchronicznej tworzą równania różniczkowe o pochodnych cząstkowych opisujące rozkład przestrzenny pola magnetycznego wewnątrz maszyny i równania różniczkowe o pochodnych zwyczajnych opisujące zależności napięciowo-prądowe w obwodach elektrycznych uzwojeń.

W ustalonym stanie pracy maszyny synchronicznej, w prostokątnym układzie współrzędnych Parka d - q związanym z wirnikiem, pole magnetyczne jest polem magnetostatycznym, nieruchomym względem wirnika, opisanym przez równania Maxwella

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{J}, \\ \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

\mathbf{H} , \mathbf{B} , \mathbf{J} – wektory natężenia i indukcji pola magnetycznego oraz wektor gęstości prądu w obszarze zajęтым przez uzwojenia.

Po wyrażeniu indukcji magnetycznej za pomocą wektorowego potencjału magnetycznego \mathbf{A}

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}, \quad (2)$$

otrzymuje się równanie różniczkowe o postaci

$$\text{rot } \frac{1}{\mu} \text{rot } \mathbf{A} = \mathbf{J}, \quad (3)$$

gdzie:

μ – przenikalność magnetyczna.

W obszarze o stałej przenikalności magnetycznej równanie (3) staje się równaniem Poissona

$$\nabla^2 \mathbf{A} = \mu \mathbf{J}. \quad (4)$$

Dla określonych warunków brzegowych i dla zadanych wymuszeń prądowych w uzwojeniach rozwiązanie równań (3) i (4) prowadzi do wyznaczenia przestrzennego rozkładu pola magnetycznego w maszynie.

Równania obwodowe modelu Parka w ustalonym stanie pracy maszyny synchronicznej są równaniami algebraicznymi o postaci

$$U_d = -\omega \Psi_q + R I_d,$$

$$U_q = \omega \Psi_d + R I_q, \quad (5)$$

$$U_f^* = I_f^* R_f^*,$$

gdzie:

$U_d, U_q, I_d, I_q, \Psi_d, \Psi_q$ – napięcia, prądy i strumienie magnetyczne uzwojenia twornika w osi d i q ,

U_f^*, I_f^*, R_f^* – napięcie, prąd i rezystancja uzwojenia wzbudzenia, sprowadzone na stronę uzwojenia twornika,

R – rezystancja uzwojenia twornika,

ω – prędkość kątowna (elektryczna) wirowania wirnika.

Równania pola magnetycznego i równania obwodów elektrycznych uzwojeń, powiązane są ze sobą przez prądy i strumienie magnetyczne uzwojeń. Strumienie magnetyczne skojarzone z uzwojeniami mogą być obliczone na podstawie wyznaczonego rozkładu pola magnetycznego z zależności

$$\Psi = \frac{2p l_z z_z}{s_p} \sum_{i=1}^{N_z} \left(\int_{s_p} A_{1i} ds - \int_{s_p} A_{2i} ds \right), \quad (6)$$

gdzie:

p – liczba par biegunów,

l_z – długość czynna boków zwojów,

z_z – liczba szeregowo połączonych zwojów w zezwoju,

s_p – powierzchnia przekroju poprzecznego pręta zezwoju,

N_z – liczba zezwojów połączonych szeregowo w uzwojeniu,

A_1, A_2 – wektorowy potencjał magnetyczny w miejscach położenia lewego i prawego boku zezwoju.

Wykorzystanie modelu połowa-obwodowego w obliczeniach stanu ustalonego maszyny synchronicznej wymaga opracowania algorytmu umożliwiającego rozwiązywanie równań obwodowych i równań pola magnetycznego w pętli iteracyjnej.

3. ALGORYTM OBLICZANIA USTALONEGO STANU ELEKTROMAGNETYCZNEGO MASZYNY SYNCHRONICZNEJ PRZY WYKORZYSTANIU MODELU POŁOWO-OBWODOWEGO

W algorytmie rozwiązywania równań pola magnetycznego prądy płynące w uzwojeniach są wielkościami wejściowymi, a strumienie magnetyczne – wielkościami wyjściowymi. Prądy w uzwojeniach muszą być wyznaczone z równań obwodów elektrycznych uzwojeń. Nie można jednak tego wykonać bezpośrednio ze względu na fakt, że zarówno strumienie magnetyczne występujące w tych równaniach, jak i indukcyjności wiążące te strumienie z prądami zależą od wyników obliczeń rozkładu pola magnetycznego. Dlatego algorytm rozwiązywania równań stanu ustalonego maszyny synchronicznej skonstruowano w postaci pętli iteracyjnych, w których, początkowy zbiór prądów w uzwojeniach jest modyfikowany w taki sposób, aby jednocześnie spełnione były równania obwodowe i polowe maszyny.

Zasadniczym założeniem, które przyjęto w opracowanym algorytmie, było przyjęcie, że w każdej iteracji równania obwodowe opisują stan elektromagnetyczny uzwojeń dla liniowego obwodu magnetycznego charakteryzowanego przez ustalony rozkład przenikalności magnetycznych, wyznaczony w poprzedniej iteracji.

Przy takim założeniu strumienie magnetyczne skojarzone z uzwojeniami związane są z prądami w uzwojeniach za pomocą relacji

$$[\Psi] = [L][I], \quad (7)$$

gdzie:

$$[\Psi] = \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_f^* \\ \Psi_q \end{bmatrix}, \quad [I] = \begin{bmatrix} I_d \\ I_f^* \\ I_q \end{bmatrix}, \quad [L] = \begin{bmatrix} L_{dd} & L_{df}^* & L_{dq} \\ L_{fd}^* & L_{ff}^* & L_{fq}^* \\ L_{qd} & L_{qf}^* & L_{qq} \end{bmatrix}.$$

Macierz indukcyjności $[L]$ jest macierzą symetryczną i pełną. Zawiera indukcyjności własne, jak i indukcyjności wzajemne między uzwojeniami w osi podłużnej d i poprzecznej q , reprezentujące wzajemne sprzężenia magnetyczne tych uzwojeń przy nasyconych rdzeniach magnetycznych w stanie obciążenia maszyny. W klasycznym modelu Parka, w którym zjawisko sprzężenia magnetycznego między osiami d i q nie jest uwzględniane, macierz indukcyjności $[L]$ ma postać

$$[L] = \begin{bmatrix} L_d & L_{ad} & 0 \\ L_{ad} & L_f^* & 0 \\ 0 & 0 & L_q \end{bmatrix}. \quad (8)$$

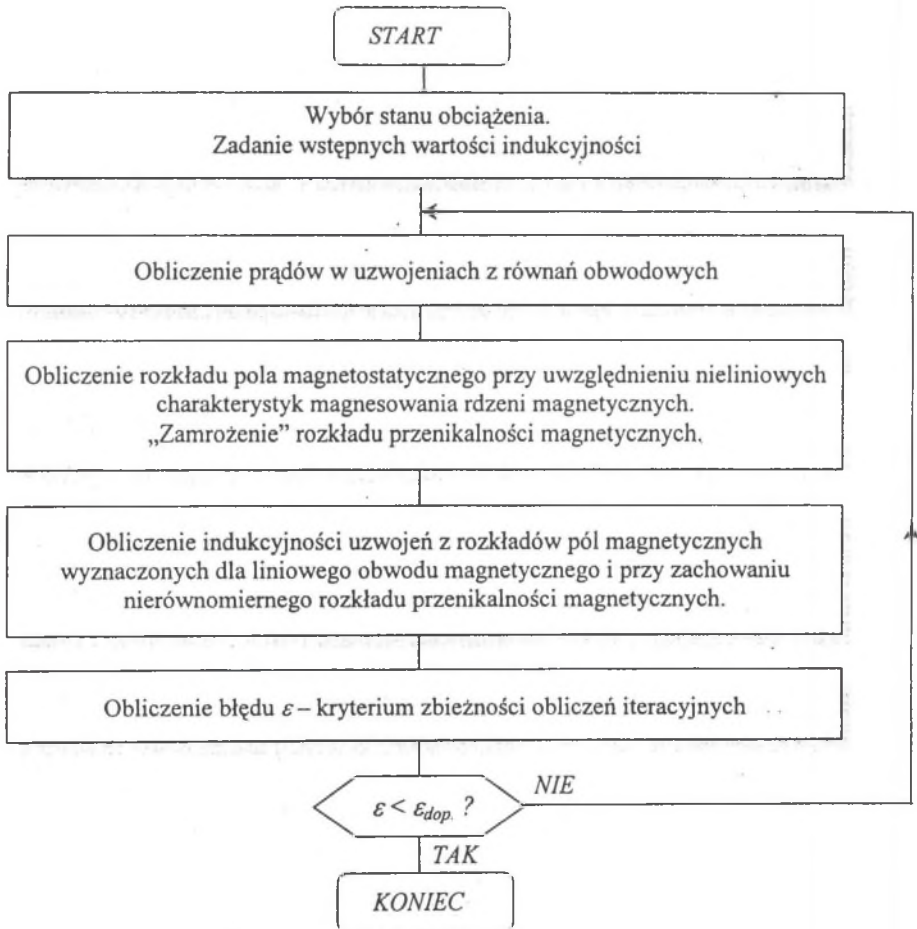
Ogólny algorytm rozwiązywania równań modelu polowo-obwodowego maszyny synchronicznej w ustalonym stanie obciążenia przedstawiono na rys. 1.

Ustalony stan obciążenia generatora synchronicznego przy stałej prędkości wirowania wirnika może być określony na podstawie trzech zadanych wielkości na zaciskach uzwojenia twornika lub wzbudzenia, na przykład:

$$\langle P, Q, U \rangle, \quad \langle U, I, \cos \varphi \rangle, \quad \langle U, I, I_f \rangle, \quad \langle I, I_f, \cos \varphi \rangle,$$

gdzie:

- P, Q – moc czynna i bierna na zaciskach uzwojenia twornika,
 $U, I, \cos \varphi$ – skuteczna wartość napięcia, prądu oraz współczynnik mocy uzwojenia twornika,
 I_f – prąd wzbudzenia.



Rys. 1. Algorytm rozwiązywania równań modelu polowo-obwodowego maszyny synchronicznej w ustalonym stanie obciążenia

Fig. 1. Algorithm of solving the field-circuit model equations of a synchronous machine in the steady-state load conditions

Korzystając z równań obwodowych maszyny (5) przy uwzględnieniu zależności (7) oraz przy założeniu, że znane są parametry elektromagnetyczne (rezystancje i indukcyjności)

maszyny, można sformułować układ nieliniowych równań algebraicznych, którego rozwiązaniem są składowe osiowe napięcia i prądu twornika (U_d, U_q, I_d, I_q) oraz prąd wzbudzenia (w przypadku gdy nie jest zadany). Na przykład, jeśli zadano moc czynną P , bierną Q oraz napięcie U na zaciskach uzwojenia twornika, wtedy układ nieliniowych równań algebraicznych przyjmuje postać

$$\begin{aligned} U_d &= -\omega(L_{qd}I_d + L_{qf}I_f^* + L_{qq}I_q) + RI_d, \\ U_q &= \omega(L_{dd}I_d + L_{df}I_f^* + L_{dq}I_q) + RI_q, \\ P &= U_dI_d + U_qI_q, \\ Q &= U_qI_d - U_dI_q, \\ U &= \sqrt{U_d^2 + U_q^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Na podstawie uzyskanych w taki sposób prądów twornika i wzbudzenia w dwuosowym modelu Parka (I_d, I_q, I_f^*), można obliczyć chwilowe wartości prądów w rzeczywistych uzwojeniach fazowych twornika i w uzwojeniu wzbudzenia

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ I_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \vartheta_o & -\sin \vartheta_o \\ \cos \left(\vartheta_o + \frac{4}{3}\pi \right) & -\sin \left(\vartheta_o + \frac{4}{3}\pi \right) \\ \cos \left(\vartheta_o + \frac{2}{3}\pi \right) & -\sin \left(\vartheta_o + \frac{2}{3}\pi \right) \\ \hline (0) & \xi_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_f^* \end{bmatrix}, \quad (10)$$

gdzie:

i_A, i_B, i_C – wartości chwilowe prądów fazowych uzwojenia twornika,

ϑ_o – kąt między osią fazy odniesienia (fazy A) a osią podłużną d w określonej chwili czasu,

ξ_f – współczynnik sprowadzenia wielkości wzbudzenia na stronę twornika.

Dla wyznaczonych prądów w uzwojeniach wykonuje się obliczenia rozkładu pola magnetycznego w maszynie przy uwzględnieniu nieliniowych charakterystyk magnesowania rdzeni magnetycznych.

Z rozkładu pola magnetycznego otrzymuje się przestrzenny rozkład przenikalności magnetycznych charakteryzujących stan nasycenia obwodu magnetycznego maszyny. Rozkład ten nie jest symetryczny względem osi d i q , co oznacza, że siła magnetomotoryczna działająca w jednej z tych osi wytwarza strumienie magnetyczne zarówno w osi d jak i q .

Nierównomierny rozkład przenikalności magnetycznych wykorzystano do przeprowadzenia analiz pola magnetycznego dla liniowego obwodu magnetycznego przy osobnym wymuszaniu prądu twornika w osi d , w osi q oraz prądu wzbudzenia. Po obliczeniu strumieni skojarzonych z uzwojeniami wyznaczono ich indukcyjności własne i wzajemne

$$L_{ij} = \frac{\Psi_j}{I_i}, \quad i, j = d, q, f. \quad (11)$$

Indukcyjności własne uzwojenia twornika w osi d i q oraz uzwojenia wzbudzenia, powiększono o indukcyjności rozproszenia czoł uzwojeń.

Dla tak otrzymanych indukcyjności obliczono następnie wielkości określające stan obciążenia maszyny, np. moc czynną P , bierną Q i napięcie U z równań obwodowych maszyny (9). Różnice między tymi wielkościami a ich wartościami zadanymi definiują błąd względny, który dla i -tego kroku iteracyjnego ma postać

$$\varepsilon_i = \frac{U_z - U_i}{U_z} + \frac{P_z - P_i}{P_z} + \frac{Q_z - Q_i}{Q_z}, \quad (12)$$

przy czym indeksem „z” oznaczono wielkości zadane, a indeksem „i” – wielkości obliczone w i -tym kroku iteracyjnym.

Jeśli błąd ε_i jest większy od założonej wartości dopuszczalnej, wtedy z równań (9) i (10) – dla nowych wartości indukcyjności – obliczane są nowe wartości prądów w uzwojeniach, a następnie powtarzane są obliczenia rozkładów pól magnetycznych w następnym kroku iteracyjnym. Zbieżność algorytmu, czyli liczba iteracji, po których uzyskuje się zadaną dokładność rozwiązania, zależy od wyboru punktów startowych i od założonej dokładności.

Powyższy algorytm wykorzystano w obliczeniach wielkości elektromagnetycznych i charakterystyk turbogeneratorskiego typu TWW-200-2 w ustalonym stanie obciążenia.

4. OBLICZANIE ROZKŁADU POLA MAGNETYCZNEGO I WIELKOŚCI ELEKTROMAGNETYCZNYCH W USTALONYM STANIE OBCIĄŻENIA ZNAMIONOWEGO TURBOGENERATORA TWW-200-2

Obliczenia przeprowadzono dla turbogeneratorskiego typu TWW-200-2 o danych zestawionych w tabeli 1.

Rozkład pola magnetycznego obliczono metodą elementów skończonych w przekroju poprzecznym generatora obejmującym jedną podziałkę biegunową, o strukturze obwodu magnetycznego przedstawionej na rys. 2a i o charakterystykach magnesowania rdzeni magnetycznych przedstawionych na rys. 2b.

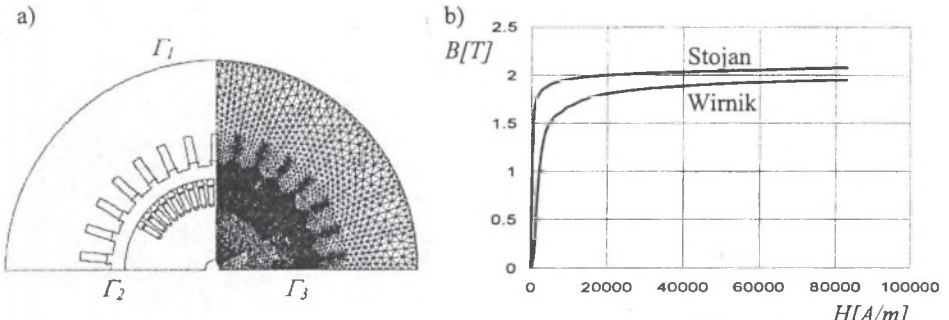
Tabela 1

Dane znamionowe i parametry elektromagnetyczne turbogeneratorskiego TWW-200-2

Dane znamionowe	$S_n = 235.3 \text{ MV}\cdot\text{A}$ $P_n = 200 \text{ MW}$	$U_n = 15.75 \text{ kV}$ $I_n = 8625 \text{ A}$	$\cos \varphi_n = 0.85$ $I_m = 2680 \text{ A}$
Standardowe parametry elektromagnetyczne	$X_d = 1.88$ $X_q \approx 1.69$	$X_\sigma = 0.1656$ $X_{ad} = 1.714$	$R_l = 0.00154 \Omega$ $R_f = 0.088 \Omega$

Dyskretyzację obszaru przeprowadzono za pomocą trójkątnych elementów skończonych pierwszego rzędu. Warunki brzegowe określono dla wektorowego potencjału magnetycznego, przyjmując zerowy warunek brzegowy Dirichleta na zewnętrznym promieniu stojana (granica Γ_1), oraz warunki okresowości na granicach rozcięcia obszaru Γ_2 i Γ_3

$$A|_{\Gamma_2} = -A|_{\Gamma_3}. \quad (13)$$



Rys. 2 a) Badany obszar przekroju poprzecznego turbogenerators TWW-200-2 i fragment siatki elementów skończonych,

b) charakterystyki magnesowania rdzeni magnetycznych stojana i wirnika

Fig. 2 a) Analysed region of the TWW-200-2 turbogenerator cross section and a part of the finite element mesh,

b) magnetization curves of the stator and rotor magnetic cores

Obliczenia numeryczne wykonano na stacji roboczej SUN SPARCstation 4. Obliczenia rozkładów pól magnetycznych wykonano za pomocą programu Opera-2D; rozwiązywanie równań obwodowych maszyny wykonano w programie Mathematica. Program sterujący wszystkimi obliczeniami przygotowano w postaci skryptu napisanego w języku powłoki C systemu Solaris.

W tabeli 2 zamieszczono wyniki obliczeń znamionowego stanu obciążenia turbogenerators TWW-200-2 dla zadanej mocy czynnej P_z , biernej Q_z i napięcia U_z na zaciskach uzwojenia twornika. Indukcyjności własne i wzajemne uzwojeń twornika w osiach d i q oraz uzwojenia wzbudzenia (f), zestawiono w formie macierzy. Macierz tych indukcyjności jest macierzą symetryczną. Różnice między wartościami indukcyjności wzajemnych po obu stronach przekątnej macierzy wynikają z błędów numerycznych, które powstają przy obliczaniu strumieni magnetycznych sprzężonych z uzwojeniami, wyznaczanych z dwóch różnych rozkładów pól magnetycznych.

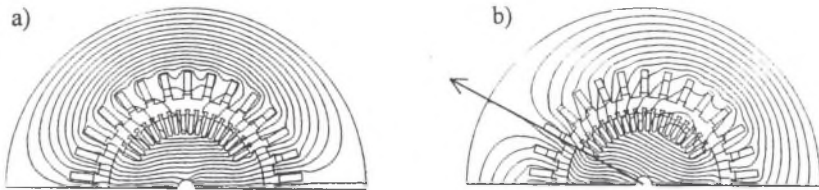
Tabela 2

Wyniki obliczeń znamionowego stanu obciążenia turbogeneratora TWW-200-2

Wielkości zadane	Wielkości obliczone		Indukcyjności			
			<i>d</i>	<i>f</i>	<i>q</i>	
$P = -0.85$	$U_d = 0.5526$	$I = 1$	d	1.536	1.319	0.094
$Q = -0.527$	$U_q = 0.8335$	$I_f^* = 1.72$	f	1.335	1.425	0.095
$U = 1$	$I_d = -0.9089$	$\delta = 33.543^\circ$	q	0.095	0.094	1.507
	$I_q = -0.4173$					

δ - kąt obciążenia; wielkości w jednostkach względnych

W każdym kroku iteracyjnym indukcyjności wyznaczone są z rozkładów pól magnetycznych obliczanych dla liniowego obwodu magnetycznego maszyny charakteryzowanego przez ustalony rozkład przenikalności magnetycznych wyznaczony z rozkładu pola magnetycznego przy uwzględnieniu nieliniowych charakterystyk magnesowania. Na rys. 3a przedstawiono rozkład linii pola magnetycznego dla takiego „zamrożonego” rozkładu przenikalności magnetycznych, przy wymuszeniu siły magnetomotorycznej w osi *d*. Widoczne jest lekkie skrzywienie osi pola magnetycznego względem osi *d*.



Rys. 3. Rozkład linii pola magnetycznego

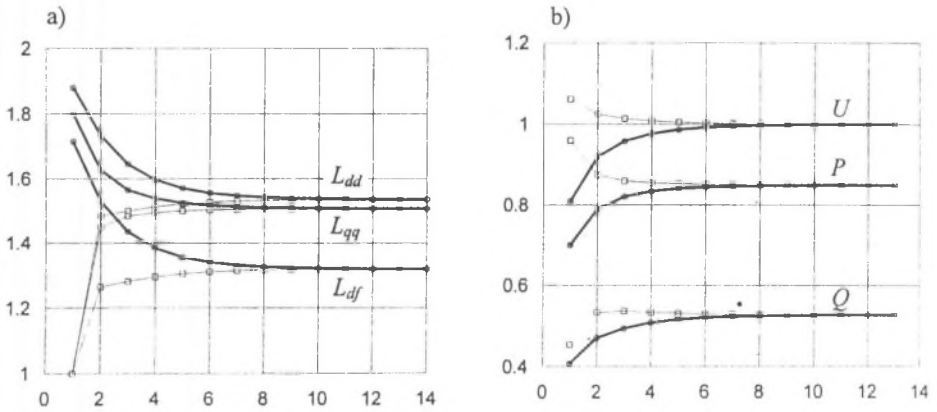
- dla „zamrożonego” rozkładu przenikalności magnetycznych i wymuszeniu siły magnetomotorycznej w osi *d*,
- dla znamionowego stanu obciążenia generatora synchronicznego

Fig. 3. Distribution of magnetic field lines

- for fixed permeability distribution and the magnetizing force applied in *d* axis
- for the synchronous generator rated load

Na rys. 3b pokazano rozkład linii pola magnetycznego w stanie znamionowego obciążenia.

Na rys. 4a przedstawiono wykresy zmian, w kolejnych iteracjach, indukcyjności L_{dd} i L_{df}^* w osi *d* oraz indukcyjności L_{qq} w osi *q*, dla różnych wartości początkowych indukcyjności. W zależności od punktu startowego oraz od założonej dokładności obliczeń, algorytm osiąga końcowy rezultat przy różnej liczbie kroków iteracyjnych.



Rys. 4. Wykresy zmian indukcyjności L_{dd} , L_{qq} , L_{df}^* (a) oraz mocy czynnej P , biernej Q i napięcia U (b) w kolejnych krokach iteracyjnych dla różnych indukcyjności początkowych

Fig. 4. Plots of changes in the inductances L_{dd} , L_{qq} , L_{df}^* (a) and in the active power P , the reactive power Q and the terminal voltage U (b) in the successive iterations for various initial inductances

Na rys. 4b podano analogiczne wykresy zmian, w kolejnych krokach iteracyjnych, mocy czynnej P , biernej Q i napięcia U . Wielkości te dążą do wartości zadanych.

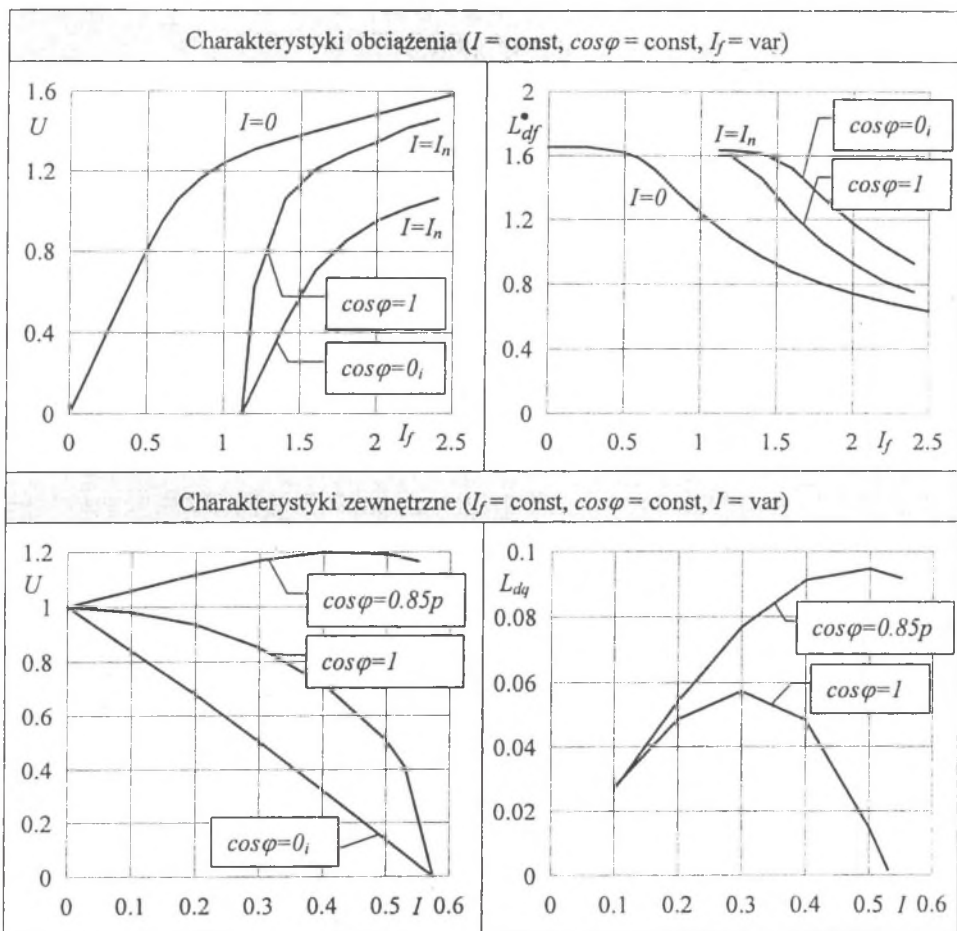
5. OBLICZENIA CHARAKTERYSTYK STANU USTALONEGO GENERATORA SYNCHRONICZNEGO

Opisany algorytm rozwiązywania równań modelu polowo-obwodowego maszyny synchronicznej w ustalonym punkcie pracy maszyny wykorzystano do obliczenia jej typowych charakterystyk:

- ◆ charakterystyki biegu jałowego i zwarcia,
- ◆ charakterystyk obciążenia przy stałym prądzie twornika,
- ◆ charakterystyk zewnętrznych przy stałym prądzie wzbudzenia.

Charakterystyki w stanie obciążenia wyznaczono dla różnych współczynników mocy.

Na rys. 5 przedstawiono charakterystyki obliczone dla turbogeneratora TWW-200-2.



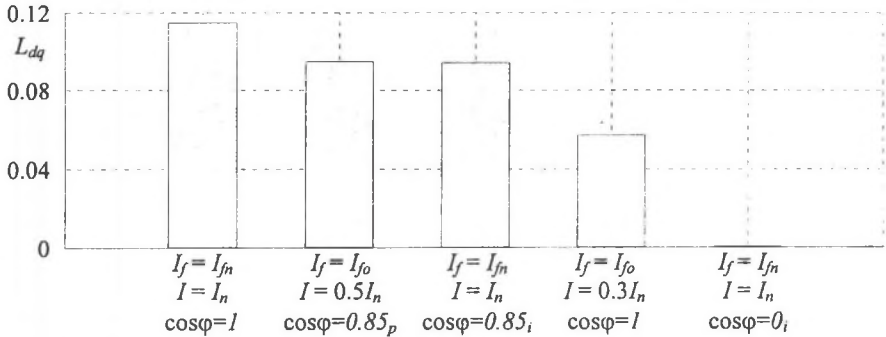
Rys. 5. Charakterystyki obciążenia i zewnętrzne oraz krzywe zmian indukcyjności L_{df} i L_{dq} dla turbogeneratora TWW-200-2

Fig. 5. Load and external characteristics as well as curves of changes in the inductances L_{df} and L_{dq} for the TWW-200-2 turbogenerator

Charakterystyki obciążenia obliczono dla znamionowego prądu twornika ($I = I_n$) i dla współczynników mocy $\cos\varphi=1$ i $\cos\varphi=0_i$. Na tym samym wykresie zamieszczono charakterystykę biegu jałowego jako szczególny przypadek charakterystyki obciążenia ($I = 0$). Na sąsiednim wykresie zamieszczono krzywe ilustrujące zmiany indukcyjności wzajemnej L_{df} dla rozpatrywanych warunków obciążenia. Charakterystyki zewnętrzne obliczono przy stałym prądzie wzbudzenia I_{fo} , który przy biegu jałowym indukuje w tworniku napięcie znamionowe oraz dla współczynników mocy $\cos\varphi=1$ (obciążenie czynne), $\cos\varphi=0_i$ (obciążenie indukcyjne) i $\cos\varphi=0.85_p$ (obciążenie czynno-pojemnościowe). Na sąsiednim wykresie podano zależność indukcyjności wzajemnej L_{dq} między uzwojeniami twornika w osi

d i q , od prądu twornika I dla współczynników mocy $\cos\varphi=1$ i $\cos\varphi=0.85_p$. Indukcyjności te można uważać za miarę sprzężenia magnetycznego między obwodami elektrycznymi w osi d i q . Dla współczynnika mocy $\cos\varphi=0_i$ zjawisko sprzężenia magnetycznego między osiami d i q nie występuje.

Na rys. 6 przedstawiono porównanie indukcyjności wzajemnych L_{dq} dla różnych stanów obciążenia rozpatrywanych w pracy.



Rys. 6. Indukcyjności wzajemne L_{dq} dla różnych stanów obciążenia turbogenerators TW-200-2

Fig. 6. Mutual inductances L_{dq} at various loads of the TW-200-2 turbogenerator

Z wykresu wynika, że zjawisko sprzężenia magnetycznego między osiami d i q występuje w największym stopniu przy współczynniku mocy $\cos\varphi=1$.

6. UWAGI KOŃCOWE

W pracy przedstawiono iteracyjną metodę obliczania parametrów i wielkości elektromagnetycznych maszyny synchronicznej w ustalonym stanie obciążenia przy wykorzystaniu modelu połowo-obwodowego. Opracowany algorytm umożliwia wyznaczenie wszystkich wielkości charakteryzujących stan elektromagnetyczny maszyny w ustalonym punkcie pracy oraz wyznaczenie rozkładu pola magnetycznego w jej przekroju poprzecznym.

Zaletą algorytmu jest możliwość uwzględnienia rzeczywistej struktury obwodu magnetycznego maszyny (złobki, zęby itd.), jak również uwzględnienie nieliniowych charakterystyk magnesowania rdzeni magnetycznych i zjawiska sprzężenia magnetycznego między obwodami elektrycznymi w osi d i q . Stosowanie modelu połowo-obwodowego ograniczone jest jednak – jak dotąd – do stosunkowo prostych układów z maszyną synchroniczną, z powodu dużych nakładów obliczeniowych wymagających komputerów o znacznej mocy obliczeniowej.

LITERATURA

1. J. Kudła: Model matematyczny oraz właściwości generatora synchronicznego w stanach ustalonych symetrycznych przy uwzględnieniu zjawiska nasycenia dla pola magnetycznego głównego. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. ser. Elektryka z. 159, Gliwice 1997, s. 125-134.
2. El-Serafi A.M., Wu J.: Determination of the Parameters Representing the Cross-Magnetizing Effect in Saturated Synchronous Machines. IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. EC-8, No 3, Sep. 1993, pp. 333-340.
3. El-Serafi A.M., Abdallah A.S.: Effect of the Cross-Magnetizing Phenomenon on the Performance of Saturated Synchronous Machines Operating in the Generating and Motoring Modes. Proceedings of the International Conference on the Evolution and Modern Aspects of Synchronous Machines, Zürich, Switzerland, August 27-29, 1991, Part 1, pp.38-43.
4. Qiao Jing-qiu, Tang Yun-qiu: Numerical Calculation of Saturated Power Angle Characteristic of Large Turbogenerator. BICEM, Aug. 1987, Pekin, pp.92-95.
5. Minnich S.H., Schulz P., Baker D.H., Sharma D.K., Farmer R.G., Fish J.H.: Saturation Functions for Synchronous Generators from Finite Elements. IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. EC-2, No 4, Dec 1987, pp.680-692.
6. Kamabu T., Maun J.C.: Synchronous and Dynamic Parameters of Large Turbine-Generators by the Finite-Element Method. IECM'86, Sep. 1986, München, pp.698-701.
7. Ashtiani C.N., Lowther D.A.: The Use of Finite Elements in the Simulation of the Steady State Operation of a Synchronous Generator with a Known Terminal Loading condition. IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-19, No.6, Nov. 1983, pp.2381-2383.

Recenzent: Dr hab. inż. Ernest Mendrela
Prof. Politechniki Opolskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 20 kwietnia 2000 r.

Abstract

A calculation method of parameters and electromagnetic quantities of a synchronous machine in any steady-state load conditions is presented using a field-circuit model. The field-circuit model constitutes voltage-current equations of machine windings (5) and equations (3) describing the magnetic field distribution in the machine. These equations are mutually coupled and must be solved simultaneously in an iterative loop. A general algorithm of solving the field-circuit model equations of a synchronous machine in steady-state load conditions is presented in Fig. 1. On the basis of the required values of the active power P , reactive power Q and voltage U between the armature winding terminals as well as the initial values of winding inductances, the non-linear set of equations (9) was solved. For the winding currents obtained from (10), analysis of the magnetic field distribution was performed by FEM taking into account non-linear magnetizing curves of magnetic cores. After "freezing"

the permeabilities, which characterize the magnetic circuit saturation state, the analysis of the magnetic field was made for the linear magnetic circuit. From the field distributions calculated in such a way, all the winding inductances were determined, including the mutual inductances between electrical circuits in d and q axes. These inductances characterize cross-coupling magnetization effect. The computations were repeated until achieving the permissible error ε defined by (12). The calculations were performed for the TWW-200-2 turbogenerator whose data are given in Table 1. Results of calculations for the machine at rated load conditions are given in Table 2. The load and external characteristics obtained from calculations as well as changes in the mutual inductances L_{df}^{\bullet} and L_{dq} are presented in Fig. 5. Fig. 6 shows a comparison of the mutual inductances L_{dq} for various steady-state load conditions considered in the paper. An advantage of the described algorithm is a possibility of taking into account the non-linear magnetizing characteristics and cross-coupling effects in the machine.