

Andrzej BOBON, Jerzy KUDŁA, Aleksander ŻYWIEC

TRANSMITANCJE WIDMOWE TURBOGENERATORA O MOCY 200 MW WYZNACZONE METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Streszczenie. Dla turbogeneratora o mocy 200 MW wyznaczono zestaw transmitancji widmowych na podstawie wyników obliczeń rozkładów quasi-stacjonarnych pól magnetycznych w maszynie. Obliczenia rozkładów pól magnetycznych przeprowadzono metodą elementów skończonych w przekroju poprzecznym maszyny dla kolejno zasilanych uzwojeń prądem sinusoidalnym o zmienianej częstotliwości. Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci charakterystyk częstotliwościowych amplitudowo-fazowych transmitancji widmowych i ich odwrotności.

SPECTRAL TRANSFER FUNCTIONS OF A 200 MW TURBOGENERATOR DETERMINED BY THE FINITE ELEMENT METHOD

Summary. A set of spectral transfer functions of a 200 MW turbogenerator has been determined basing on solutions of quasi-stationary magnetic field in the machine. Calculations of magnetic field distributions have been carried out in the machine cross-section by means of the finite element method for variable-frequency sinusoidal currents in the successively fed windings. The calculation results have been presented in the form of frequency magnitude-phase characteristics of the spectral transfer functions and their reciprocals.

1. WPROWADZENIE

Transmitancje operatorowe maszyny synchronicznej i odpowiadające im transmitancje widmowe reprezentują dynamiczne właściwości maszyny dla liniowego obwodu magnetycznego oraz przy stałej prędkości wirowania wirnika lub przy niewielkich zmianach prędkości wokół wartości ustalonej. Transmitancje te wykorzystywane są do:

- ♦ opisu statycznych i dynamicznych stanów maszyny w dziedzinie czasu i częstotliwości, takich jak kołysania elektromechaniczne, procesy regulacyjne wywołane działaniem regulatorów wzbudzenia, stany asynchroniczne itp.
- ♦ syntezy schematów zastępczych modeli obwodowych maszyn i wyznaczania ich parametrów elektromagnetycznych.

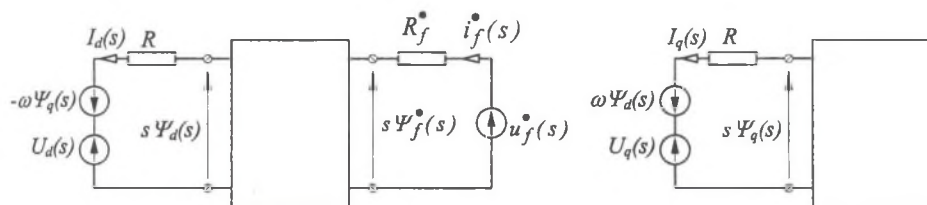
Transmitancje widmowe mogą być wyznaczone metodami pomiarowymi, numerycznymi i analitycznymi. Pomiar transmitancji widmowych napotyka wiele trudności – zwłaszcza dla dużych generatorów synchronicznych – związanych z doborem odpowiednich źródeł zasilania, przyrządów pomiarowych oraz z zapewnieniem odpowiedniej dokładności pomiarów w warunkach przemysłowych. Z kolei metody analityczne mogą być stosowane tylko dla bardzo uproszczonego modelu maszyny i nie zapewniają wystarczającej dokładności wyników. Numeryczne metody wyznaczania transmitancji widmowych wykorzystują wyniki obliczeń rozkładów pól magnetycznych w maszynie, które mogą być przeprowadzone z dostateczną dokładnością metodą elementów skończonych. Zaletą tych metod jest możliwość wyznaczenia transmitancji widmowych maszyny na etapie jej projektowania.

W artykule przedstawiono metodę wyznaczania transmitancji widmowych maszyny synchronicznej na podstawie wyników obliczeń rozkładów pól magnetycznych przeprowadzonych metodą elementów skończonych. Wyniki obliczeń, w postaci charakterystyk częstotliwościowych amplitudowo-fazowych transmitancji widmowych i ich odwrotności, przedstawiono dla turbogeneratorsa o mocy 200 MW.

2. OPERATOROWE I WIDMOWE TRANSMITANCJE MASZyny SYNCHRONICZNEJ

W modelu matematycznym maszyny synchronicznej w układzie współrzędnych d - q związanym z wirnikiem można wyodrębnić zastępcze uzwojenia twornika w osiach d i q oraz uzwojenie wzbudzenia, do których dołączane są zewnętrzne źródła i obwody. Przy pominięciu oddziaływania elektromagnetycznego między osiami d i q model maszyny może być reprezentowany przez czwórnik w osi d i dwójnik w osi q , przedstawione na rys. 1.

Szczegółowa postać modelu matematycznego zależy przede wszystkim od sposobu odwzorowania obwodów prądów wirowych w litych elementach wirnika. Dla liniowego obwodu magnetycznego maszyny obwody prądów wirowych wirnika o stałych rozłożonych mogą być reprezentowane przez transmitancje operatorowe wyrażające związki pomiędzy wielkościami elektrycznymi w obwodach twornika i wzbudzenia.



Rys. 1. Ogólne schematy zastępcze maszyny synchronicznej w osiach *d* i *q*
 Fig. 1. General equivalent circuits of a synchronous machine in *d* and *q* axes

Na podstawie relacji między strumieniami magnetycznymi a prądami zastępczych uzwojeń twornika w osi *d* i *q* i uzwojenia wzbudzenia

$$\begin{bmatrix} \Psi_d(s) \\ \Psi_f^*(s) \\ \Psi_q(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{do}(s) & L_{df}^*(s) & 0 \\ L_{fd}^*(s) & L_{fo}^*(s) & 0 \\ 0 & 0 & L_q(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I_d(s) \\ i_f^*(s) \\ -I_q(s) \end{bmatrix}, \tag{1}$$

definiuje się indukcyjności operatorowe:

$$\begin{aligned} L_{do}(s) &= \left. \frac{\Psi_d(s)}{-I_d(s)} \right|_{i_f=0}, & L_{df}^*(s) &= L_{fd}^*(s) = \left. \frac{\Psi_d(s)}{i_f^*(s)} \right|_{I_d=0}, \\ L_{fo}^*(s) &= \left. \frac{\Psi_f^*(s)}{i_f^*(s)} \right|_{I_d=0}, & L_q(s) &= \frac{\Psi_q(s)}{I_q(s)}, \end{aligned} \tag{2}$$

przy czym indukcyjności w osi *d* określone są przy otwartym uzwojeniu twornika ($L_{df}^*(s), L_{fo}^*(s)$) lub przy otwartym uzwojeniu wzbudzenia ($L_{do}(s), L_{fd}^*(s)$). Kropką oznaczono wielkości wirnika sprowadzone na stronę twornika.

Inną grupę transmitancji operatorowych określają relacje między strumieniami magnetycznymi twornika w osi *d* i *q* i prądem wzbudzenia a prądami twornika w osi *d* i *q* i napięciem wzbudzenia, czyli relacje wynikające z równań hybrydowych czwornika w osi *d*:

$$\begin{bmatrix} \Psi_d(s) \\ i_f^*(s) \\ \Psi_q(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d(s) & G^*(s) & 0 \\ K^*(s) & H^*(s) & 0 \\ 0 & 0 & L_q(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I_d(s) \\ u_f^*(s) \\ -I_q(s) \end{bmatrix}, \tag{3}$$

$$L_d(s) = \left. \frac{\Psi_d(s)}{-I_d(s)} \right|_{u_f=0}, \quad G^*(s) = \left. \frac{\Psi_d(s)}{u_f^*(s)} \right|_{I_d=0}, \tag{4}$$

$$K^{\bullet}(s) = \frac{i_f^{\bullet}(s)}{-I_d(s)} \Big|_{u_f=0}, \quad H^{\bullet}(s) = \frac{i_f^{\bullet}(s)}{u_f^{\bullet}(s)} \Big|_{I_d=0}$$

Między transmitancjami (2) i (4) zachodzą następujące związki:

$$L_d(s) = L_{d0}(s) - \frac{s L_{df}^2(s)}{R_f^{\bullet} + s L_{fo}^{\bullet}(s)}, \quad K^{\bullet}(s) = -s G^{\bullet}(s),$$

$$G^{\bullet}(s) = \frac{L_{df}^{\bullet}(s)}{R_f^{\bullet} + s L_{fo}^{\bullet}(s)}, \quad H^{\bullet}(s) = \frac{R_f^{\bullet}}{R_f^{\bullet} + s L_{fo}^{\bullet}(s)}. \quad (5)$$

Transmitancje widmowe otrzymuje się przez zastąpienie operatora różniczkowania s w transmitancjach operatorowych (2) i (4) przez zespoloną częstotliwość $j\omega = j\nu\omega_n$:

$$W(s) \rightarrow \underline{W}(j\nu\omega_n) \quad (6)$$

gdzie:

$$\nu = \frac{\omega}{\omega_n} = \frac{f}{f_n} \quad - \text{względna częstotliwość,}$$

f, f_n – częstotliwość, częstotliwość znamionowa.

W pracy wyznaczono indukcyjności widmowe $\underline{L}_{d0}(\nu), \underline{L}_{df}^{\bullet}(\nu), \underline{L}_{fo}^{\bullet}(\nu), \underline{L}_q(\nu)$ generatora synchronicznego na podstawie wyników obliczeń rozkładów pól magnetycznych w maszynie metodą elementów skończonych. Pozostałe transmitancje widmowe zostały obliczone z zależności (5).

3. WYZNACZANIE ROZKŁADU POLA MAGNETYCZNEGO W MASZynie SYNCHRONICZNEJ METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Przy założeniu liniowych charakterystyk magnesowania rdzeni ferromagnetycznych ($\mu = \text{const}$) oraz sinusoidalnie zmiennych w czasie prądów w uzwojeniach, rozkład quasi-stacjonarnego pola magnetycznego w poszczególnych obszarach maszyny synchronicznej opisuje równanie różniczkowe

$$\nabla^2 \underline{A} - \underline{k}^2 \underline{A} = -\mu \underline{J}_z \quad (7)$$

gdzie:

\underline{A} – zespolony wektor potencjału magnetycznego,

\underline{J}_z – zespolony wektor gęstości prądu zewnętrznych źródeł,

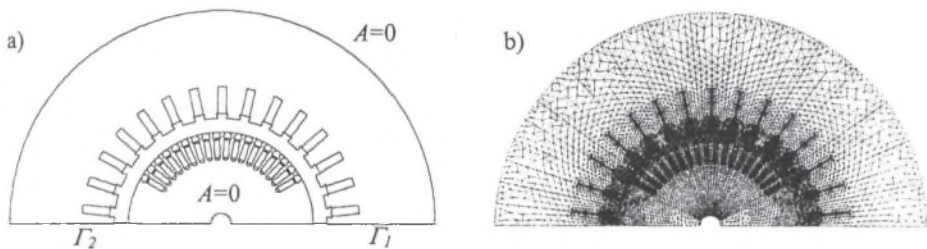
$\underline{k}^2 = j \omega \mu \gamma,$

μ, γ – przenikalność magnetyczna i konduktywność elektryczna.

W poszczególnych podobszarach maszyny równanie (7) przyjmuje prostszą postać równania Poissona (w uzwojeniach z zadaniem prądem o gęstości \underline{J}), Helmholtza (w materiałach z prądami wirowymi) bądź Laplace'a (w materiałach nieprzewodzących).

Równanie pola (7) zostało rozwiązane metodą elementów skończonych, przy wykorzystaniu programu komputerowego OPERA-2D firmy Vector Fields, przy następujących warunkach brzegowych (rys. 2a):

- ♦ zerowych warunkach brzegowych Dirichleta na zewnętrznym promieniu stojana i na wewnętrznym promieniu jarzma wirnika,
- ♦ warunkach antyokresowości na granicach Γ_1 i Γ_2 położonych na osi d : $A|_{\Gamma_1} = -A|_{\Gamma_2}$.



Rys. 2. a) Obszar analizy pola magnetycznego w turbogeneratorze o mocy 200 MW i przyjęte warunki brzegowe, b) siatka elementów skończonych (28071 elementów, 14245 węzłów)

Fig.2. a) Region of the 200 MW turbogenerator being analysed and the assumed boundary conditions, b) the finite element mesh (28071 elements, 14245 nodes)

Badany obszar generatora został pokryty siatką trójkątnych elementów skończonych (rys. 2b). W każdym elemencie skończonym rozkład potencjału aproksymowany został wielomianem pierwszego stopnia. Po przekształceniach równanie pola (7) sprowadza się do układu równań algebraicznych postaci

$$[K][A] = [F] \quad (8)$$

gdzie

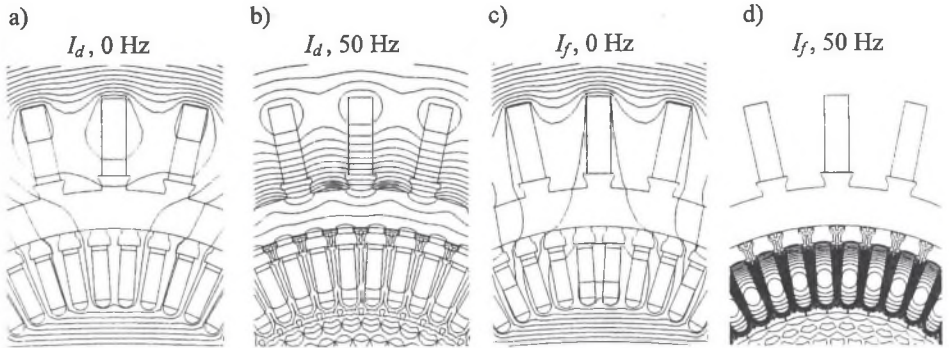
$[K]$ – macierz współczynników,

$[A]$ – wektor wartości węzłowych potencjału magnetycznego,

$[F]$ – wektor wymuszeń.

Algorytm rozwiązywania układu równań (8) o dużym rozmiarze uwzględnia specyficzne cechy macierzy współczynników $[K]$: symetrię, pasmowość i rzadkość.

Na rys. 3 przedstawiono rozkłady linii potencjału magnetycznego ($\text{Re}\{A\}=\text{const}$) w strefie żłobków stojana i wirnika w pobliżu osi q , w polu magnetycznym wytworzonym przez prąd twornika w osi d (a,b) i prąd wzbudzenia (c,d) o częstotliwości 0 Hz oraz 50 Hz.



Rys. 3. Linie potencjału magnetycznego $\text{Re}\{A\}=\text{const}$ w polu magnetycznym wytworzonym przez prąd twornika w osi d (a, b) oraz prąd wzbudzenia (c, d) dla częstotliwości $f=0$ i 50 Hz

Fig.3. Potential lines $\text{Re}\{A\}=\text{const}$ in the magnetic field produced by the armature current in the d axis (a, b), and field current (c, d) for 0 and 50 Hz frequency

W polu magnetycznym zmieniającym się z częstotliwością 50 Hz widoczny jest efekt wypierania pola do szczeliny powietrznej przez prądy indukowane w obwodach tłumiących wirnika.

Na podstawie wyznaczonego rozkładu pola magnetycznego obliczono strumień magnetyczny skojarzony z poszczególnymi uzwojeniami maszyny. Strumień skojarzony z k -tym uzwojeniem jest sumą strumieni skojarzonych z pojedynczymi zwojami szeregowo połączonymi w uzwojeniu

$$\underline{\Psi}_k = \sum_i \underline{\Phi}_{zi} \quad (9)$$

gdzie:

$\underline{\Phi}_{zi}$ – strumień skojarzony z i -tym zwojem o powierzchni s i czynnej długości l_z

$$\underline{\Phi}_{zi} = \int_s \underline{B} ds = \int_s \text{rot} \underline{A} ds = \int_l \underline{A} dl = l_z (\underline{A}_{1sri} - \underline{A}_{2sri}), \quad (10)$$

$\underline{A}_{1,2sri}$ – potencjał magnetyczny uśredniony na powierzchni przekroju poprzecznego pręta s_p lewego (1) i prawego (2) boku i -tego zwoju

$$\underline{A}_{1,2sri} = \frac{l}{s_p} \int_{s_p} \underline{A}_{1,2i} ds. \quad (11)$$

4. WYZNACZENIE TRANSMITANCJI WIDMOWYCH MASZYNYSYNCHRONICZNEJ NA PODSTAWIE WYNIKÓW OBLICZEŃ ROZKŁADU POLA MAGNETYCZNEGO

Indukcyjności widmowe maszyny synchronicznej wyznaczono na podstawie definicyjnych zależności (2).

Dla określonej częstotliwości prądu w kolejno zasilanych uzwojeniach maszyny (A, B, C, f) i otwartych uzwojeniach nie zasilanych przeprowadzono obliczenia rozkładu pól magnetycznych w obszarze czynnym generatora synchronicznego. Na podstawie wyznaczonych rozkładów pól wyznaczono strumienie magnetyczne skojarzone z uzwojeniami, a następnie indukcyjności zespolone własne i wzajemne uzwojeń. Otrzymaną w ten sposób macierz indukcyjności $[\underline{L}_{ABCf}(v_i)]$ dla względnej częstotliwości v_i , transformowano do układu współrzędnych osiowych d - q - 0

$$[\underline{L}_{dq0f}(v_i)] = [C][\underline{L}_{ABCf}(v_i)][C]^T \quad (12)$$

gdzie:

$$[\underline{L}_{dq0f}(v_i)] = \begin{bmatrix} \underline{L}_{do}(v_i) & 0 & 0 & \underline{L}_{df}^*(v_i) \\ 0 & \underline{L}_q(v_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{L}_0(v_i) & 0 \\ \underline{L}_{fd}^*(v_i) & 0 & 0 & \underline{L}_{fo}^*(v_i) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$[\underline{L}_{ABCf}(v_i)] = \begin{bmatrix} \underline{L}_{AA}(v_i) & \underline{L}_{AB}(v_i) & \underline{L}_{AC}(v_i) & \xi_f \underline{L}_{Af}(v_i) \\ \underline{L}_{BA}(v_i) & \underline{L}_{BB}(v_i) & \underline{L}_{BC}(v_i) & \xi_f \underline{L}_{Bf}(v_i) \\ \underline{L}_{CA}(v_i) & \underline{L}_{CB}(v_i) & \underline{L}_{CC}(v_i) & \xi_f \underline{L}_{Cf}(v_i) \\ \xi_f \underline{L}_{fA}(v_i) & \xi_f \underline{L}_{fB}(v_i) & \xi_f \underline{L}_{fC}(v_i) & \xi_f^2 \underline{L}_{ff}(v_i) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$[C]$ – ortogonalna macierz transformacji

$$[C] = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 \\ \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{6} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

ξ_f – współczynnik sprowadzenia wielkości związanych z uzwojeniem wzbudzenia na stronę twornika

$$\xi_f = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{N_s k_{ws}}{N_f k_{wf}},$$

N_s, N_f – liczba szeregowo połączonych zwojów jednej fazy uzwojenia twornika i uzwojenia wzbudzenia,

k_{ws}, k_{wf} – współczynnik uzwojenia twornika i uzwojenia wzbudzenia dla podstawowej harmonicznej przestrzennej.

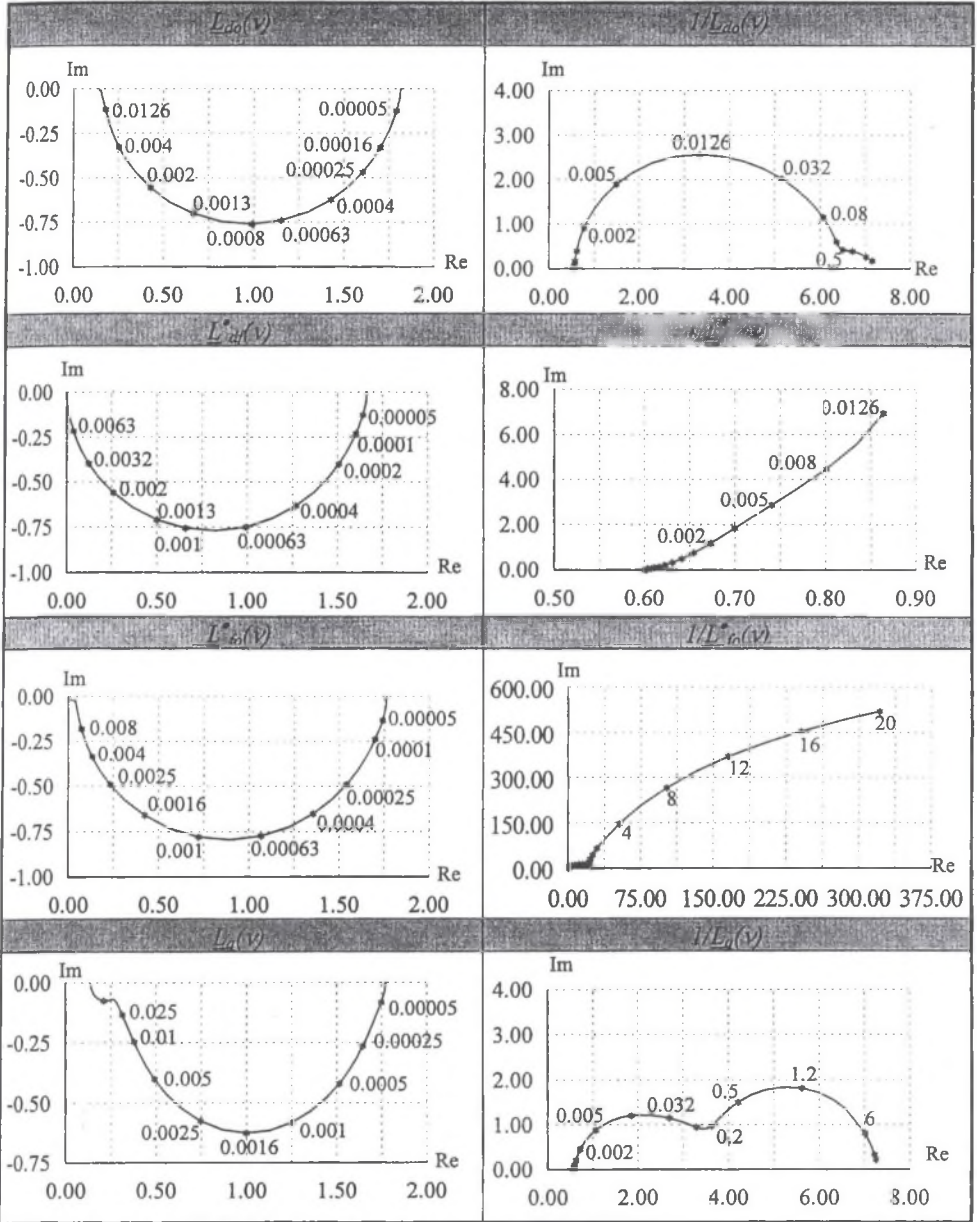
Powtarzając opisaną procedurę dla częstotliwości z zakresu 0.001+1000 Hz, wyznaczono indukcyjności widmowe (2), a następnie, przy wykorzystaniu związków (5), pozostałe transmitancje (4).

5. CHARAKTRYSTYKI CZĘSTOTLIWOŚCIOWE OBLICZONYCH TRANSMITANCJI WIDMOWYCH

Obliczenia transmitancji widmowych wykonano dla turbogeneratorsa o mocy 200 MW ($S_n=235,3$ MV·A, $U_n=15,75$ kV, $I_n=8625$ A, $\cos\varphi_n=0,85$, $n_n=3000$ obr/min), którego obwody tñumiące stanowią blok lity i kliny żłobkowe wirnika.

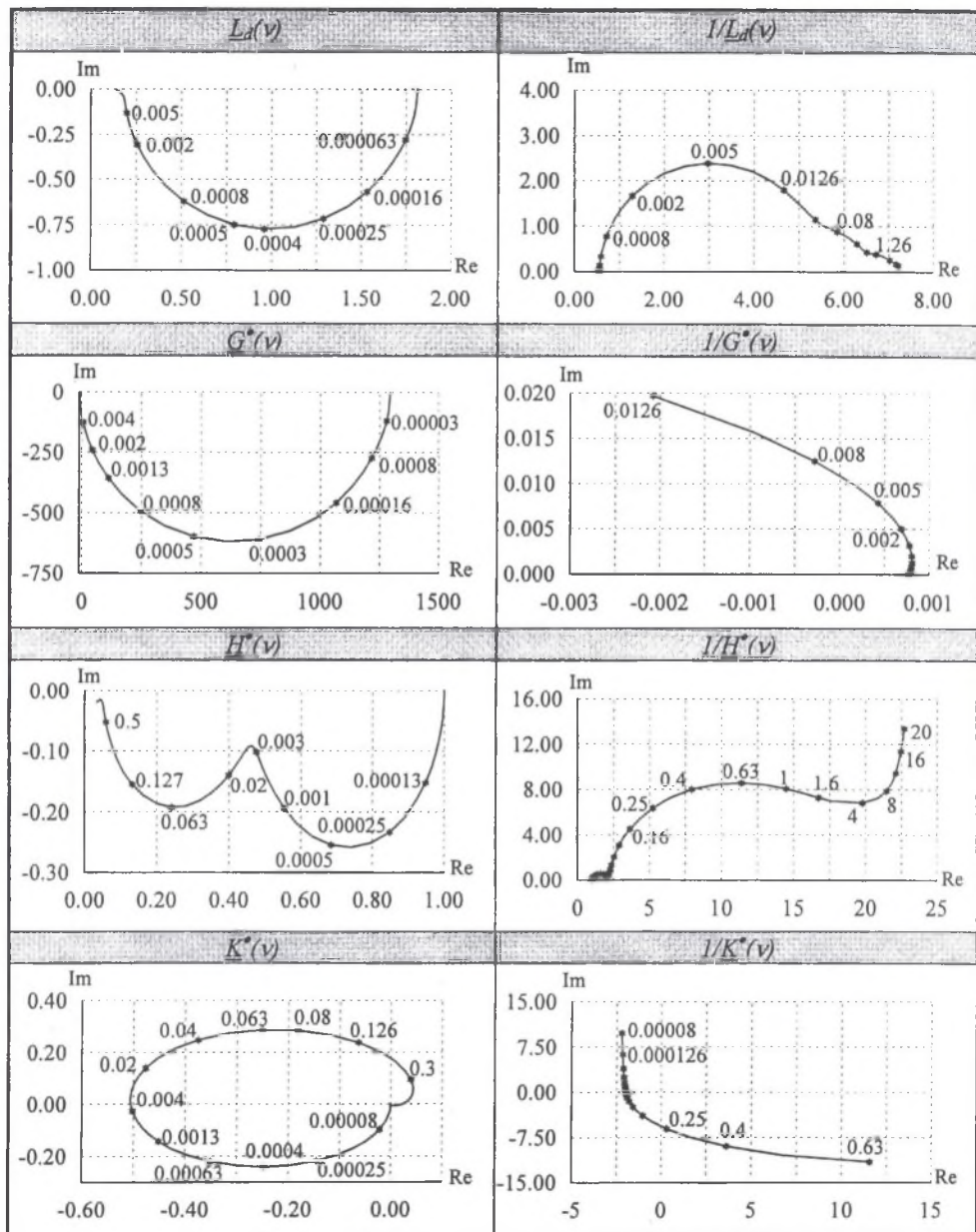
Na rys. 4 przedstawiono amplitudowo-fazowe charakterystyki częstotliwościowe indukcyjności widmowych $\underline{L}_{do}(\nu)$, $\underline{L}_{df}^*(\nu)$, $\underline{L}_{fo}^*(\nu)$, $\underline{L}_q(\nu)$ oraz ich odwrotności. Biorąc pod uwagę logarytmiczny rozkład częstotliwości, w zakresie małych częstotliwości dobrze widoczny jest przebieg charakterystyk indukcyjności widmowych, podczas gdy w zakresie wysokich częstotliwości lepiej widoczny jest przebieg ich odwrotności. Na rys. 5 przedstawiono analogiczne charakterystyki transmitancji widmowych $\underline{L}_d(\nu)$, $\underline{G}^*(\nu)$, $\underline{H}^*(\nu)$, $\underline{K}^*(\nu)$ oraz ich odwrotności.

Na rys. 6 przedstawiono amplitudowo-fazowe charakterystyki częstotliwościowe indukcyjności widmowej dla składowej zerowej $\underline{L}_0(\nu)$ i jej odwrotności. Jak widać



Rys. 4. Charakterystyki amplitudowo-fazowe indukcyjności widmowych i ich odwrotności dla turbogeneratora 200 MW

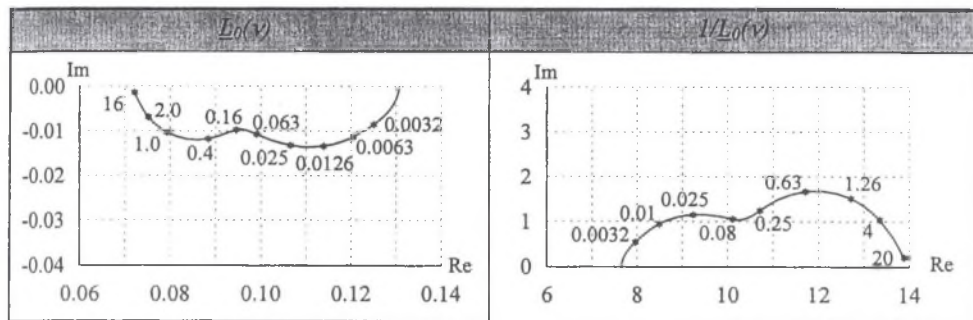
Fig. 4. Magnitude and phase characteristics of the spectral inductances and their reciprocals for the 200 MW turbogenerator



Rys. 5. Charakterystyki amplitudowo-fazowe transmitancji widmowych i ich odwrotności dla turbogeneratora 200 MW

Fig. 5. Magnitude and phase characteristics of the spectral transfer functions and their reciprocals for the 200 MW turbogenerator

z zamieszczonych wykresów, również ta indukcyjność zależy od częstotliwości, wyrażając wpływ prądów wirowych indukowanych w wirniku przez strumienie wyższych harmonicznych.



Rys. 6. Charakterystyki amplitudowo-fazowe indukcyjności widmowej dla składowej zerowej $L_0(\nu)$ i jej odwrotności dla turbogeneratora 200 MW

Fig. 6. Magnitude and phase characteristics of the zero-sequence spectral inductance and its reciprocal for the 200 MW turbogenerator

W tabeli 1 podano wartości transmitancji widmowych dla granicznych częstotliwości $\nu=0$ i $\nu \rightarrow \infty$. Wartości te są liczbami rzeczywistymi i dotyczą stanu ustalonego ($\nu=0$) oraz pierwszej chwili stanu zakłóceniewego ($\nu \rightarrow \infty$).

Tabela 1
Wartości graniczne transmitancji widmowych
(w jednostkach względnych)

Transmitancja $\underline{W}(\nu)$	$\lim_{\nu \rightarrow 0} \underline{W}(\nu)$	$\lim_{\nu \rightarrow \infty} \underline{W}(\nu)$
$\underline{L}_{do}(\nu)$	1,813	0,1387
$\underline{L}_{df}^*(\nu)$	1,663	0
$\underline{L}_{fo}^*(\nu)$	1,763	0,00164
$\underline{L}_d(\nu)$	1,813	0,1387
$\underline{G}^*(\nu)$	1295	0
$\underline{K}^*(\nu)$	0	0
$\underline{H}^*(\nu)$	1	0,038
$\underline{L}_q(\nu)$	1,772	0,1378

Zerowe wartości graniczne transmitancji widmowych $\underline{L}_{df}^{\bullet}(\nu)$, $\underline{G}^{\bullet}(\nu)$ i $\underline{K}^{\bullet}(\nu)$ (wiążących wielkości twornika z wielkościami wzbudzenia) dla częstotliwości dążącej do nieskończoności, oznaczają niewrażliwość strumieni skojarzonych twornika na zmiany prądu lub napięcia wzbudzenia i odwrotnie – niewrażliwość prądu wzbudzenia na zmiany prądu twornika przy wysokich częstotliwościach, to znaczy w pierwszych chwilach stanu zakłócenowego ($t \rightarrow 0$, $\nu \rightarrow \infty$). Właściwości te są wynikiem efektu ekranowania uzwojenia wzbudzenia, spowodowanego oddziaływaniem prądów wirowych w przewodzących materiałach klinów żłobkowych i zębów wirnika turbogeneratora znajdujących się w warstwie rozdzielającej uzwojenie wzbudzenia od szczeliny.

6. UWAGI KOŃCOWE

W pracy przedstawiono wyniki obliczeń zestawu transmitancji widmowych turbogeneratora o mocy 200 MW, opisujących jego właściwości dynamiczne w dziedzinie częstotliwości. W obliczeniach wykorzystano rozkłady przestrzenne pól magnetycznych, wyznaczone metodą elementów skończonych na podstawie danych konstrukcyjnych i danych materiałowych maszyny. Obliczone transmitancje widmowe mogą być wykorzystane bezpośrednio w badaniach statycznych i dynamicznych stanów generatora synchronicznego w dziedzinie częstotliwości i czasu, jak również mogą stanowić podstawę do syntezy obwodowych modeli matematycznych maszyny – szczególnie wyższych rzędów – i wyznaczania ich parametrów elektromagnetycznych.

LITERATURA

1. Boboń A., Kudła J., Żywiec A.: Parametry elektromagnetyczne maszyny synchronicznej. Wykorzystanie metody elementów skończonych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.

2. Boboń A., Kudła J., Żywiec A.: Validation of the high-order mathematical models of turbogenerators in investigations of dynamic performances of power systems. International Workshop on Electrical Machines, 11-12 Sept. 1996, Prague, pp.110-119.
3. Boboń A., Kudła J., Żywiec A.: Determination of Spectral Transfer Functions of a Synchronous Machine by the Finite Element Method. International Workshop on Electrical Machines, 7-8 Sep. 1998, Prague.
4. Dougherty J.W., Minnich S.H.: Operational inductances of turbine-generators; Test data versus finite-element calculations. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol PAS-102, No 10, October 1983, pp 3393-3404.

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

Wpłynęło do Redakcji dnia 20 marca 1999 r.

Abstract

The paper presents the method of determining spectral transfer functions of a synchronous machine basing on the spatial magnetic field distributions calculated by the finite element method. For the given frequency of the current (of range 0.001÷1000 Hz) in the successively fed windings (A , B , C , f) and the other windings opened, the magnetic field analysis has been carried out for the active region of the synchronous generator. As a result of the field analysis, the flux linkages of the windings as well as the self- and mutual-inductances have been determined. The inductance matrix $[L_{ABCf}(\nu)]$ calculated for the given frequency has been transformed into the d - q reference frame. Thus the spectral inductances $\underline{L}_{do}(\nu)$, $\underline{L}_{df}^{\bullet}(\nu)$, $\underline{L}_{fo}^{\bullet}(\nu)$ and $\underline{L}_q(\nu)$ have been obtained and – basing on them (Eqn. 5) – the remaining spectral transfer functions $\underline{L}_d(\nu)$, $\underline{G}^{\bullet}(\nu)$, $\underline{H}^{\bullet}(\nu)$, $\underline{K}^{\bullet}(\nu)$ have been determined. The magnitude and phase frequency characteristics of the complete set of the spectral transfer functions and their reciprocals have been presented in Figs. 4, 5 and 6 .for the 200 MW turbogenerator. The upper- and lower-bound values of spectral transfer functions (for $\nu=0$ and $\nu \rightarrow \infty$) have been given in Table 1. The calculated spectral transfer functions can

be used in investigation of static and transient states of a synchronous generator in the frequency and time domains, as well as they can be applied to synthesis of the machine circuit mathematical models – especially of higher order – and determining their electromagnetic parameters.