

Andrzej BOBŃ

Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych

WYZNACZANIE INDUKCYJNOŚCI ROZPROSZEŃ POŁĄCZEŃ CZOŁOWYCH UZWOJEŃ GENERATORA SYNCHRONICZNEGO NA PODSTAWIE ROZKŁADU POŁA ELEKTROMAGNETYCZNEGO W STREFIE SKRAJNEJ*

Streszczenie. Przedstawiono przybliżoną metodę wyznaczania indukcyjności rozproszeŃ połączeń czołowych uzwojenia twornika i wzbudzenia maszyny synchronicznej dużej mocy na podstawie wyników analizy pola elektromagnetycznego w strefie skrajnej. Analizę pola przeprowadzono metodą elementów skończonych przy założeniu sinusoidalnego rozkładu pola w kierunku obwodowym w strefie skrajnej (tzw. analiza pola 2 1/2-wymiarowa). Obliczenia numeryczne wykonano dla turbogeneratora o mocy 200 MW.

DETERMINATION OF END-WINDING LEAKAGE INDUCTANCES OF THE SYNCHRONOUS GENERATOR USING FIELD ANALYSIS RESULTS IN THE END-REGION

Summary. A simplified method of determination of end-winding leakage inductances for the large power synchronous machine using field analysis results in the end-region is presented in the paper. The electromagnetic field analysis is performed by the finite element method assuming sinusoidal distribution of the field along the circumference (2 1/2 D solution). Numerical computations are carried out for the 200 MW turbogenerator.

1. WPROWADZENIE

Zagadnienia związane z opisem zjawisk elektromagnetycznych występujących w strefie skrajnej maszyn synchronicznych należą do najtrudniejszych do rozwiązywania. Przyczynami

* Pracę zrealizowano w ramach projektu badawczego nr 8 T10A 01011, finansowanego w 1997 r. przez KBN.

trudności są zarówno skomplikowane kształty geometryczne czoł uzwojeń i pozostałych elementów konstrukcyjnych w tej strefie, jak również złożoność samych zjawisk elektromagnetycznych. Prądy płynące w czołach uzwojenia twornika posiadają wszystkie trzy składowe (promieniową, obwodową i osiową) i wytwarzają pola magnetyczne rozproszenia wirujące względem rdzenia stojana. Na pola te nakłada się pole magnetyczne rozproszenia czoł uzwojenia wzbudzenia oraz pole magnetyczne rozproszenia jako odgałęzienie pola magnetycznego głównego w szczelinię. Rozkład pola magnetycznego w strefie skrajnej maszyny zakłócają ponadto prądy wirowe indukowane w skrajnych pakietach blach elektrotechnicznych stojana oraz w przewodzących elementach konstrukcyjnych. Są one przyczyną dodatkowych strat mocy czynnej i nagrzewania się tych elementów.

Podstawą wyznaczenia indukcyjności rozproszeń czoł uzwojeń jest analiza pola elektromagnetycznego w strefie skrajnej. W pracy analizę pola przeprowadzono metodą elementów skończonych w płaskim przekroju strefy skrajnej w płaszczyźnie przechodzącej przez oś wzdłużną maszyny przy założeniu symetrii obrotowej tego obszaru i sinusoidalnego rozkładu pola w kierunku obwodowym (tzw. analiza pola 2 1/2-wymiarowa). Analizę pola wykonano przy wykorzystaniu programu FEMAG dla turbogeneratorskiego typu TWW-200-2 o mocy 200 MW.

2. ANALIZA POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO W STREFIE CZÓŁ UZWOJEŃ GENERATORA SYNCHRONICZNEGO

Rozkład pola elektromagnetycznego w obszarze strefy skrajnej generatora synchronicznego pracującego w ustalonym stanie pracy (pola quasi-ustalonego) opisują równania Maxwella

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{J}_z + \mathbf{J}_w, \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \mathbf{D} &= 0, \\ \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

\mathbf{H} , \mathbf{B} - wektor natężenia i indukcji pola magnetycznego,

\mathbf{E} , \mathbf{D} - wektor natężenia i indukcji pola elektrycznego,

\mathbf{J}_z - wektor gęstości prądu zewnętrznego (wymuszonego przez zewnętrzne źródła),

\mathbf{J}_w - wektor gęstości prądów wirowych.

Wielkości pola związane są ze sobą za pomocą równań materiałowych

$$B = \mu(H) H, \quad D = \varepsilon E, \quad J_w = \gamma E, \quad (2)$$

gdzie:

$\mu(H)$ - przenikalność magnetyczna zależna od pola magnetycznego (w materiałach ferromagnetycznych),

ε - przenikalność dielektryczna,

γ - konduktywność.

Po wprowadzeniu do równań (1), (2) wektorowego potencjału magnetycznego A i skalarnego potencjału elektrycznego V_e , określonych przez zależności

$$B = \text{rot } A, \quad E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \text{grad } V_e \quad (3)$$

oraz po uwzględnieniu warunku kalibracji Lorentza $\text{div } A = -\mu\gamma V_e$, otrzymuje się ogólne równanie dla potencjału wektorowego A o postaci

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot } A \right) + \gamma \frac{\partial A}{\partial t} - \gamma \text{grad} \left(\frac{1}{\mu\gamma} \text{div } A \right) = J_z \quad (4)$$

Równanie (4) upraszcza się w podobszarach strefy skrajnej charakteryzujących się stałą przenikalnością magnetyczną

$$\nabla^2 A = -\mu_0 J_z \quad - \text{w uzwojeniach } (\gamma=0, \mu=\mu_0), \quad (5)$$

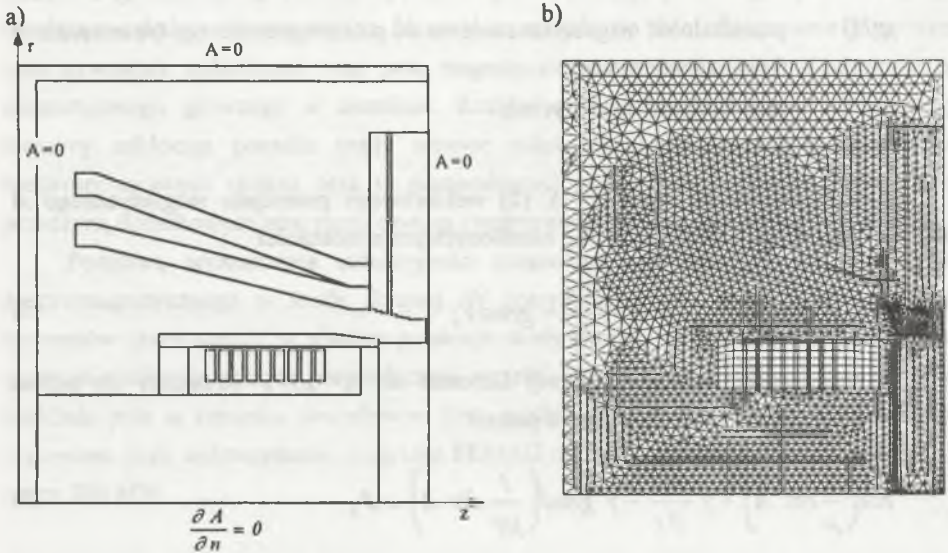
$$\nabla^2 A = \mu\gamma \frac{\partial A}{\partial t} \quad - \text{w podobszarach z prądami wirowymi } (\gamma=\text{const}, \mu=\text{const}), \quad (6)$$

$$\nabla^2 A = 0 \quad - \text{w podobszarach bezprądowych } (\gamma=0, \mu=\text{const}). \quad (7)$$

Wyznaczenie elektrycznego potencjału skalarnego V_e nie jest konieczne do określenia rozkładu pola magnetycznego.

Przy założeniu sinusoidalnego rozkładu magnetycznego potencjału wektorowego A w kierunku obwodowym strefy skrajnej, analiza pola elektromagnetycznego może być przeprowadzona w płaszczyźnie (r, z) układu współrzędnych cylindrycznych (r, φ, z) przechodzącej przez oś wzdłużną maszyny. Magnetyczny potencjał wektorowy A posiada wtedy tylko jedną składową obwodową A_φ , a równania pola (4-7) stają się równaniami skalarnymi.

Przedstawiony na rys. 1 badany obszar strefy skrajnej zawiera czoła uzwojeń twornika i wzbudzenia, skrajny pakiet blach stojana, niemagnetyczny kołpak, pierścień centrujący, fragment wału i beczki wirnika.



Rys. 1. Obszar strefy skrajnej turbogenerators: a) kontury podobszarów i warunki brzegowe na granicach obszaru, b) siatka elementów skończonych

Fig. 1. End-region of the turbogenerator: a) contours of subregions and boundary conditions, b) finite element mesh

W przyjętym modelu strefy skrajnej pole magnetyczne wytwarzają składowe obwodowe prądów w czołach uzwojenia twornika i wzbudzenia. Pominięto składowe osiowe „z” prądów w czołach uzwojenia twornika i wzbudzenia i składowe promieniowe prądu w czołach uzwojenia twornika.

W obszarze czoł uzwojenia twornika wymuszono zastępczy prąd czoł I_c płynący w kierunku obwodowym maszyny, reprezentujący przepływ trzech prądów fazowych w uzwojeniu twornika

$$I_c = \theta_1 = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{z_1 \xi_{I(1)}}{p} I_{1m} \quad (8)$$

gdzie:

θ_1 - wypadkowy przepływ trójfazowego uzwojenia twornika,

- $z_1, \xi_{1(l)}$ - liczba zwojów i współczynnik uzwojenia twornika dla podstawowej harmonicznej przepływu,
 p - liczba par biegunów,
 I_{1m} - amplituda prądu fazowego twornika.

Podobszary charakteryzują się odrębnymi właściwościami elektrycznymi i magnetycznymi. Dla ferromagnetycznej stali odkuwki wirnika wału i pierścienia centrującego uwzględniono nieliniowe charakterystyki magnesowania. Dla skrajnego pakietu blach stojana o właściwościach anizotropowych założono stałą przenikalność magnetyczną o wartości pośredniej dla kierunku osiowego i promieniowego, oraz stałą przewodność elektryczną.

Do rozwiązania równań pola elektromagnetycznego w strefie skrajnej maszyny synchronicznej zastosowano metodę elementów skończonych przy wykorzystaniu programu FEMAG¹. Na rys.1b przedstawiono siatkę elementów skończonych wygenerowanych przez program FEMAG, zaś na rys.1a zaznaczono warunki brzegowe przyjęte na zewnętrznych granicach obszaru.

3. WYZNACZENIE INDUKCYJNOŚCI ROZPROSZEŃ CZÓŁ UZWOJEŃ GENERATORA

Połączenia czołowe uzwojeń twornika i wzbudzenia, znajdujące się w polu magnetycznym rozproszenia w strefie skrajnej, posiadają indukcyjności własne i wzajemne określone przez zależności

$$\begin{aligned}
 L_{1\sigma} &= \frac{\Psi_{1\sigma}}{I_1}, & L_{f\sigma} &= \frac{\Psi_{f\sigma}}{I_f}, \\
 L_{1f\sigma} &= \frac{\Psi_{1f\sigma}}{I_1}, & L_{f1\sigma} &= \frac{\Psi_{f1\sigma}}{I_f},
 \end{aligned} \tag{9}$$

gdzie:

- $L_{1\sigma} L_{f\sigma}$ - indukcyjności rozproszenia czoł uzwojeń twornika i wzbudzenia,
 $L_{1f\sigma} L_{f1\sigma}$ - indukcyjności wzajemne czoł uzwojeń twornika i wzbudzenia, przy czym $L_{1f\sigma} = L_{f1\sigma}$ dla obwodu magnetycznego liniowego,

¹ Licencjonowana kopia programu FEMAG, opracowanego w ETH Zürich, zainstalowana jest w Katedrze Maszyn i Urządzeń Elektrycznych na stacjach roboczych SUN.

$\Psi_{I\sigma}$, $\Psi_{f\sigma}$, $\Psi_{I_f\sigma}$, $\Psi_{I_l\sigma}$, I_l , I_f - strumienie skojarzone i prądy czoł uzwojeń twornika i wzbudzenia.

Strumienie magnetyczne skojarzone, określające indukcyjności (9), wyznaczono na podstawie rozkładów pól elektromagnetycznych wytworzonych przez prąd płynący w jednym uzwojeniu (twornika, następnie wzbudzenia) i otwartym drugim uzwojeniu. Strumienie te obliczane są z zależności

$$\Psi = \oint_s B ds = \oint_l A dl, \quad (10)$$

przy czym całki obliczane są po powierzchni s zajętej przez dane uzwojenie, ograniczonej konturem l .

W przyjętym do rozważań modelu obwodu elektromagnetycznego strefy skrajnej wyznaczono indukcyjność rozproszenia czoł zastępczego uzwojenia twornika L_c . Indukcyjność rozproszenia czoł rzeczywistego uzwojenia twornika z prądem o amplitudzie I_{Im} można otrzymać korzystając z zasady równoważności energii pola magnetycznego

$$W_m = \frac{1}{2} L_c I_c^2 = \frac{1}{2} L_{I\sigma} \left(\sqrt{\frac{3}{2}} I_{Im} \right)^2. \quad (11)$$

Otrzymuje się stąd związek

$$L_{I\sigma} = \frac{2}{3} L_c \left(\frac{I_c}{I_{Im}} \right)^2 = \frac{6}{\pi^2} L_c \left(\frac{z_1 \xi_{I(1)}}{p} \right)^2. \quad (12)$$

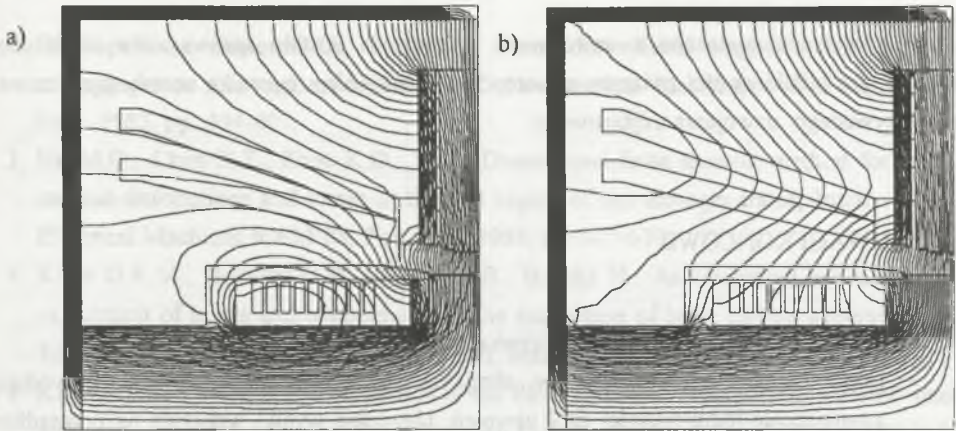
4. WYNIKI OBLICZEŃ INDUKCYJNOŚCI ROZPROSZEŃ CZÓŁ UZWOJEŃ

Analizę rozkładu pola elektromagnetycznego w strefie skrajnej i obliczenia indukcyjności czoł uzwojeń przeprowadzono dla turbogenerатора typu TWW-200-2 o mocy 200 MW.

Na rys.2a,b przedstawiono rozkład linii ekwipotencjalnych potencjału wektorowego A (pokrywających się z przebiegiem linii strumienia magnetycznego) wytworzonego przez prąd w czołach uzwojenia wzbudzenia (a) i prąd w czołach uzwojenia twornika (b).

Obliczenia wykonano dla trzech wariantów, zestawionych w tablicy 1, w celu uchwycenia wpływu:

- prądów wirowych indukowanych w skrajnych pakietach blach stojana,
- nieliniowości charakterystyki magnesowania beczki i wału wirnika.



Rys.2. Rozkład linii ekwipotencjalnych potencjału magnetycznego A wytworzonego przez prąd w czołach uzwojenia wzbudzenia (a) i prąd w czołach uzwojenia twornika (b)

Fig.2. Distribution of equipotential curves of magnetic potential A generated by the field current (a) and the armature current (b) in the winding end connections

Dla nieliniowego obwodu magnetycznego maszyny obliczenia przeprowadzono dla stanu nasycenia prądem wzbudzenia I_{f0} indukującym w tworniku znamionowe napięcie w stanie biegu jałowego.

W tabeli 1 podano wartości wyznaczonych indukcyjności czoł uzwojeń (własnych $L_{f\sigma}$, $L_{l\sigma}$ i wzajemnych $L_{f\sigma}$), oraz wartości procentowych odchyłek $\Delta\%$ w porównaniu do odpowiednich indukcyjności dla wariantu 1.

Tabela 1

Indukcyjności czoł uzwojeń generatora

Wariant		Indukcyjności [H]	$\Delta\%$
1	Brak prądów wirowych. Liniowa charakterystyka magnesowania wału i beczki wirnika	$L_{f\sigma}=3.547 \cdot 10^{-6}$ $L_{l\sigma}=4.402 \cdot 10^{-4}$ $L_{f\sigma}=2.834 \cdot 10^{-6}$	—
2	Prądy wirowe w skrajnych pakietach blach stojana. Liniowa charakterystyka magnesowania wału i beczki wirnika	$L_{f\sigma}=1.756 \cdot 10^{-6}$ $L_{l\sigma}=1.668 \cdot 10^{-4}$ $L_{f\sigma}=9.428 \cdot 10^{-7}$	50.5 % 62.1 % 66.7 %
3	Brak prądów wirowych. Nieliniowa charakterystyka magnesowania wału i beczki wirnika	$L_{f\sigma}=3.543 \cdot 10^{-6}$ $L_{l\sigma}=4.397 \cdot 10^{-4}$ $L_{f\sigma}=2.831 \cdot 10^{-6}$	0.11 % 0.11 % 0.11 %

Indukcyjności związane z uzwojeniem wzbudzenia zostały sprowadzone na stronę twornika, zaś indukcyjności związane z zastępczym uzwojeniem twornika zostały przeliczone dla rzeczywistego uzwojenia trójfazowego.

5. UWAGI KOŃCOWE

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń można wyciągnąć następujące wnioski:

- prądy wirowe indukowane w skrajnych pakietach blach stojana powodują zmniejszenie indukcyjności czoł uzwojeń. Uzyskane wyniki wskazują na przesadnie duży wpływ prądów wirowych, co spowodowane zostało brakiem możliwości uwzględnienia anizotropii magnetycznej i elektrycznej skrajnego pakietu blach stojana,
- nieliniowość charakterystyki magnesowania wału i beczki wirnika ma bardzo niewielki wpływ na indukcyjności czoł uzwojeń. Wywołane jest to znacznym udziałem reluktancji elementów niemagnetycznych na drodze przebiegu strumienia magnetycznego w strefie skrajnej. Obliczenia indukcyjności czoł uzwojeń mogą być zatem wykonywane dla liniowego modelu obwodu magnetycznego strefy skrajnej generatora.

Poprawę dokładności obliczeń indukcyjności czoł uzwojeń generatora można uzyskać poprzez:

- uwzględnienie trójwymiarowości rozkładu pola magnetycznego w strefie czoł, w szczególności poprzez rezygnację z zastępczego uzwojenia twornika i rozpatrzenie poszczególnych faz tego uzwojenia,
- uwzględnienie anizotropii skrajnego pakietu blach stojana w celu dokładniejszego wyznaczenia składowej osiowej indukcji pola magnetycznego w tym obszarze indukującej prądy wirowe.

LITERATURA

1. Barbero V., Dal Mut G., Grigoli G., Santamaria M.: Axisymmetric analysis and experimental measurements of magnetic field in the end region of a turbine generator, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-19, No. 6, Nov. 1983, pp. 2623-2627.

2. Di Napoli A., Honorati O., Santini E.: Three dimensional magnetic field analysis in turbogenerator end-regions, Intern. Conf. on Electrical Machines ICEM'82, Budapest, Sept. 1982, pp. 404-407.
3. Hu M.Q., Chen X.Z., Zhou K.D.: Three Dimensional finite element method for the eddy current distributions and losses in the end region of the turbogenerator, Intern. Conf. on Electrical Machines ICEM'88, Pisa, Sept. 1988, pp. 607-610.
4. Khan G.K.M., Buckley G.W., Bennet R.B., Brooks N.: An integrated approach for the calculation of losses and temperatures in the end-region of large turbine generators, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 5, No. 1, March 1990, pp. 183-194.
5. Krajewski W., Salon S.J.: Comparison of the BEM and FEM approach for a zoned medium with eddy-current subregions, Prace Instytutu Elektrotechniki, z. 165, 1991, ss. 107-118.
6. Nomura T., Maeda S.: Analysis of magnetic flux in stator end windings of large turbine generators using Fourier expansion, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-26, No. 2, March 1990, pp. 933-936.
7. Sarma M.S., Wilson J.C., Lawrenson P.J., Jokl A.L.: End-winding leakage of high-speed alternators by three-dimensional field determination, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, No. 2, March/April 1971, pp. 465-477.
8. Sikora R., Lipiński W., Gramz M., Gawrylczyk K., Pałka R., Gratkowski S., Ziółkowski M.: Pole magnetyczne i związane z nim parametry całkowite w strefie czołowej maszyn elektrycznych, Rozprawy Elektrotechniczne, 28, z.1-2, 1982, ss. 67-95.
9. Woldek A.I., Danilewicz J.B., Kosaczewski W.I., Jakowlew W.I.: Elektromagnitnyje processy w torciowych czastkach elektriceskich maszin. Energoatomizdat, Leningrad 1983.
10. Xia Dong, Feng Er-jian: The SSPFEM analysis of the eddy currents and the magnetic fields in the turbine generator end regions, Intern. Conf. on Electrical Machines ICEM'90, Massachusetts, USA, pp. 730-735.

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

Wpłynęło do Redakcji dnia 30 maja 1997 r.

Abstract

A simplified method of determination of the end-winding leakage inductances for the large power synchronous machine using field analysis results in the end-region is presented in the paper. The electromagnetic field analysis is carried out by the finite element method assuming sinusoidal distribution of the field along the circumferential direction ($2\frac{1}{2} D$ solution). The field is described by magnetic vector potential A in the axial cross section of the end-winding region of the machine. The examined region is shown in Fig.1 and contains armature and field end connections, the stator end sheet packet, the non-magnetic retaining ring, the center ring, and a part of the rotor shaft and the solid rotor body. An equivalent current flowing in the subregion of armature end connections in the circumferential direction is impressed, representing ampere-turns of three phase armature windings. The field analysis results are used for the determination of magnetic fluxes coupling machine windings in the end-region, and afterwards - for the evaluation of winding inductances according to the relationships (9). Numerical computations are carried out for the 200 MW turbogenerator. Values of the end-winding inductances calculated for three cases taking into account eddy-currents influence and the non-linear magnetization curve of the rotor steel are given in the table 1.

LITERATURA

1. Harvey, V., Das, M., El, Singh, G., Sathyan, M. "An analytical and experimental investigation of the effect of the end region of a synchronous generator." IEEE Trans. on Energy Conv., Vol. 10, No. 4, pp. 1983, 1985.