

Kamil Grzybacz, Konrad Łatak, Tadeusz J. Sobczyk
Politechnika Krakowska,
Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii

ANALIZA SPEKTRALNA PRĄDÓW TURBOGENERATORA DUŻEJ MOCY W PRZYPADKACH NIESYMETRII WEWNĘTRZNEJ UZWOJEŃ STOJANA I WZBUDZENIA

SPECTRAL ANALYSIS OF CURRENTS FOR HIGH POWER TURBOGENERATOR AT INTERNAL ASYMMETRY OF ARMATURE AND FIELD WINDINGS

Streszczenie: W pracy przedstawiono model matematyczny turbogenerators duzej mocy uwzględniający dowolną niesymetrię uzwojeń stojana i wzbudzenia. W modelu są reprezentowane elementarne jednozwojne cewki uzwojenia stojana oraz cewki zwojenia wzbudzenia umieszczone w tym samym żłobku. Uwzględniono pełne spektrum przepływów takich cewek. W modelu nie uwzględniono uzwojeń tłumiących. Do modelowania dowolnej konfiguracji cewek wykorzystano technikę macierzy więzów. Równania modelu uporządkowano wprowadzając do opisu składowe symetryczne napięcia i prądów stojana. Analizę spektralną prądów przeprowadzono metodą bilansu harmonicznyc. Obliczono i przedstawiono przykładowe widma prądów przy zwarciu elementarnyc cewek stojana oraz cewek w uzwojeniu wzbudzenia. Wskazano na cechy charakterystyczne widm, które mogą być wykorzystane do diagnostyki. Obliczenia wykonano dla szacunkowo przyjętych danych konstrukcyjnych więc wyniki mają jedynie poglądowy charakter.

Abstract: The paper presents a mathematical model of high power turbo-generator which allows considering an arbitrary asymmetry of stator and field windings. In the model are represented individual one-turn stator coils and coils of the field winding located in common slot. Full spectra of coil's MMF are considered. However dumping windings are omitted. An arbitrary connections of those elementary coils are modelled by the constrain matrix technique. Resulting model equations are ordered by introducing the symmetrical components of stator currents and voltages. Spectral analysis of currents has been done by the harmonic balance method. Exemplary spectra of currents have been calculated and are presented for chosen cases of short circuited elementary stator and field coils. The features of the spectra have been discuss form diagnostics point of view. Calculations in this paper have been done for approximated design data of turbo-generator, so results have only qualitative character.

Słowa kluczowe: turbogenerator, niesymetrie uzwojeń, model matematyczny, analiza spektralna prądów.

Keywords: turbo-generator, winding asymmetry, mathematical model, spectral analysis of currents.

1. Wstęp

Turbogeneratory należą do obiektów znajdujących się pod specjalnym nadzorem. Ich systemy diagnostyczne są bardzo rozbudowane i obejmują wiele układów zabezpieczających funkcjonowanie całego węzła generacyjnego. Kluczową rolę dla poprawnej pracy generatora odgrywają procesy elektromagnetyczne. Diagnostyka elektromagnetycznego stanu turbogenerators jest ciągle problemem badawczym podejmowanym w wielu ośrodkach badawczych [2][3][7].

W ostatnich dziesięcioleciach rozwinęły się na użytek maszyn indukcyjnych nowe metody diagnostyczne wykorzystujące spektralną analizę pomiarowo dostępnych prądów uzwojeń.

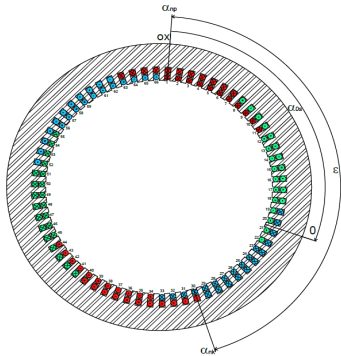
Bazują one na powiązaniu zmian w widmach Fouriera prądów fazowych z wewnętrznymi uszkodzeniami uzwojeń maszyny oraz zmianą geometrii szczeliny powietrznej. Nowe algorytmy diagnostyczne wykorzystują te relacje - mniej lub bardziej jednoznaczne - do predykcji stanu maszyny.

W niniejszej pracy podjęto próbę utworzenia modelu matematycznego turbogenerators duzej mocy umożliwiającego śledzenie relacji między widmami Fouriera prądów a niesymetriami w uzwojeniach stojana i wirnika. Model taki powinien z jednej strony zapewniać możliwość uwzględniania dowolnej niesymetrii uzwojeń stojana oraz wzbudzenia, a z drugiej dawać możliwość precyzyjnego określenia zmian w widmie częstotliwościowym prądów.

W tym celu utworzono model, który bazuje na cewkach elementarnych tworzących uzwojenia stojana i wzbudzenia, a docelowy kształt uzwojeń otrzymuje się jako wynik odpowiedniego łączenia cewek elementarnych, w uzwojenia poprawne lub modelujące stany awaryjne. Dla łączenia tych cewek w uzwojenia w modelu matematycznym zastosowano macierze więzów. Naruszenie symetrii uzwojeń powoduje istotne zwiększenie złożoności modelu matematycznego opisującego turbogenerator z niesymetrycznymi uzwojeniami. Predykcja właściwości takiego układu wymaga zastosowania specjalnych metod analizy. W pracy wykorzystano w tym celu metodę bilansu harmoniczných.

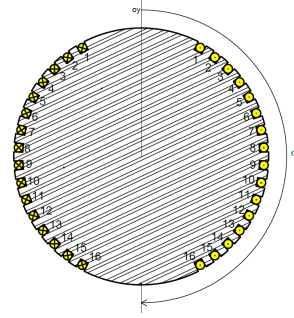
2. Model matematyczny

W pracy przedstawiono model turbogenerators ograniczony do dwóch uzwojeń: trójfazowego uzwojenia twornika (stojana) oraz uzwojenia wzbudzenia. Nie uwzględniano uzwojeń i elementów tłumiących ze względu na pogładowy charakter pracy, a także brak danych do ich poprawnego modelowania. Rozmieszczenie elementarnych cewek uzwojenia stojana przedstawiono na Rys.1 W rozpatrywanym przypadku uzwojenie stojana tworzy 66 jednozwojnych cewek. Uzwojenie każdej fazy ma liczbę żłobków na biegun i fazę $q=11$, podziałkę biegunową $\tau=33$ oraz poskok $y=29$.



Rys. 1 Rozmieszczenie elementarnych cewek na stojanie

Uzwojenie wzbudzenia składa się z 16. cewek o 12 zwojach, jest umieszczone w 32. z 44. żłobków. Numeracja cewek jest przedstawiona na Rys.2. Oznacza to, że nie objęto modelem ewentualnych uszkodzeń wewnątrz tych 16. cewek.



Rys. 2 Rozmieszczenie cewek na wirniku

Model matematyczny turbogenerators z cewkami elementarnymi nie połączonymi w uzwojenia tworzy układ równań różniczkowych o postaci

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{se,s} + \mathbf{L}_{e,s} & \mathbf{M}_e(\varphi) \\ \mathbf{M}_e(\varphi)^T & \mathbf{L}_{se,w} + \mathbf{L}_{e,w} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{e,s} \\ \mathbf{i}_{e,w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{e,s} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_{e,w} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{e,s} \\ \mathbf{i}_{e,w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{e,s} \\ \mathbf{u}_{e,w} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Ma on stosunkowo duże wymiary. Wektor $\mathbf{i}_{e,s}$ tworzy 66 prądów elementarnych cewek stojana, a wektor $\mathbf{i}_{e,w}$ zawiera 16 prądów cewek wirnika. Wymiary poszczególnych macierzy są jednoznacznie określone przez te wektory prądów. Układ (1) ma łącznie wymiary (82×82) . Macierze indukcyjności głównych oraz rezystancji określono na podstawie prawdopodobnych danych konstrukcyjnych turbogenerators o mocy rzędu 300MW. Założono, że szczelina powietrza jest równomierna, uwzględniająca zastępczo żłobkowanie stojana i wirnika. Indukcyjności własne i wzajemne elementarnych uzwojeń wyznaczono z ogólnego wzoru

$$L_{n,m} = \Lambda \sum_{\rho=1}^{\infty} \left(\frac{w_n k_{n,\rho}}{\rho} \right) \left(\frac{w_m k_{m,\rho}}{\rho} \right) \cos \rho(\alpha_n - \alpha_m) \quad (2)$$

w którym: w_n, w_m oznaczają liczby zwojów danej pary cewek, $k_{n,\rho}, k_{m,\rho}$ oznaczają współczynniki uzwojeń każdej z cewek dla harmonicznej ρ , kąty α_n, α_m określają położenie magnetycznych osi cewek, a wartość $\Lambda = \frac{4}{\pi} \mu_0 \frac{r_l l_z}{\delta_z}$ jest określana na podstawie zastępczych wartości wymiarów geometrycznych obwodu magnetycznego: promienia, grubości szczeliny powietrznej oraz długości.

Szczegółowo wyznaczono macierze indukcyjności rozproszonych uwzględniając sprzężenia magnetyczne cewek elementarnych przez strumienie rozproszonych zarówno żłobkowych jak i w strefie połączeń czołowych. Dla cewek stojana uwzględniano sprzężenie cewek elementarnych położonych w tym samym żłobku, czyli cewek o numerach różniących się o 29 oraz 37, a także sprzężenie kilku sąsiednich cewek elementarnych przez strumienie rozproszonych w części czołowej. W macierzy indukcyjności rozproszonych cewek wzbudzenia uwzględniano sprzężenia przez strumienie rozproszone w sąsiadujących częściach czołowych. Wartości indukcyjności rozproszonych określono na podstawie wzorów znanych w literaturze.

Równanie turbogeneratora przy dowolnym skojarzeniu elementarnych cewek stojana otrzymuje się wykorzystując macierze więzów określające związki między prądami cewek elementarnych a niezależnymi prądami po ich połączeniu w uzwojenia

$$\mathbf{i}_{e,s} = \mathbf{C}_s \mathbf{i}_s \quad \mathbf{i}_{e,w} = \mathbf{C}_w \mathbf{i}_w \quad (3)$$

Macierze więzów zależą od sposobu połączenia cewek w uzwojenia, a ich wymiary od liczby niezależnych prądów w powstałych obwodach. Dla przypadku połączenia stojana w symetryczne uzwojenie trójfazowe macierz \mathbf{C}_s ma wymiar (66x3) i wynika z Rys.1. W przypadku symetrii macierz \mathbf{C}_w , odpowiadająca szeregowemu połączeniu wszystkich cewek, ma wymiar (16x1). Ze względu na ich wymiary ich szczegółowe postaci nie są prezentowane. Macierze \mathbf{C}_s oraz \mathbf{C}_w zapewniają możliwość uwzględnienia dowolnej konfiguracji uzwojeń stojana i wirnika utworzonej z cewek elementarnych, a zatem dowolnej niesymetrii.

Równania modelu turbogeneratora uwzględniającego połączenia cewek elementarnych mają postać

$$\frac{d}{dt} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{L}_{os} + \mathbf{L}_s & \mathbf{M}(\varphi) \\ \mathbf{M}(\varphi)^T & \mathbf{L}_{ow} + \mathbf{L}_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_w \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} \mathbf{R}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_s \\ \mathbf{u}_w \end{bmatrix} \quad (4)$$

Nowe macierze oblicza się z zależności

$$\mathbf{L}_{os} + \mathbf{L}_s = \mathbf{C}_s^T (\mathbf{L}_{oe,s} + \mathbf{L}_{e,s}) \mathbf{C}_s$$

$$\mathbf{L}_{ow} + \mathbf{L}_w = \mathbf{C}_w^T (\mathbf{L}_{oe,w} + \mathbf{L}_{e,w}) \mathbf{C}_w$$

$$\mathbf{M}(\varphi) = \mathbf{C}_s^T (\mathbf{M}_e(\varphi)) \mathbf{C}_w$$

$$\mathbf{R}_s = \mathbf{C}_s^T (\mathbf{R}_{e,s}) \mathbf{C}_s \quad \mathbf{R}_w = \mathbf{C}_w^T (\mathbf{R}_{e,w}) \mathbf{C}_w$$

Wymiary układu równań (4) zależą od liczby niezależnych prądów obwodów powstałych w stojanie i wirniku. W przypadku symetrii otrzymuje się układ czterech równań. Technika macierzy więzów pozwala wygenerować macierze indukcyjności w (4) dla dowolnej niesymetrii uzwojeń, przy uwzględnianiu dowolnej liczby harmonicznych w ich przepływach. Szczególne znaczenie posiada macierz $\mathbf{M}(\varphi)$, w której reprezentowane są harmoniczne przestrzennego rozkładu pola w szczelinie powietrznej generowane przez niesymetrię.

Układ równań (4) w przypadku niesymetrii uzwojeń traci cechy symetrii charakterystyczne dla symetrycznej maszyny synchronicznej i klasyczne metody analizy stosowane dla maszyn synchronicznych o symetrycznej budowie nie są skuteczne. Metoda bilansu harmonicznych jest w takich przypadkach bardzo efektywna [4]. Pozwala określać jakościowo i ilościowo widma Fouriera prądów w stanie dowolnej niesymetrii w stanie pracy ustalonej. Na jej użytek wygodnie jest wprowadzić do opisu składowe symetryczne prądy i napięcia uzwojeń stojana zgodnie z definicjami

$$\mathbf{i}^s = \mathbf{T}_s \mathbf{i}_s \quad \mathbf{u}^s = \mathbf{T}_s \mathbf{u}_s \quad (5)$$

\mathbf{T}_s jest zmodyfikowaną macierzą transformacji składowych symetrycznych przekształcającą prądy i napięcia faz do składowych symetrycznych oraz zachowującą inne prądy i napięcia, co symbolicznie pokazano w poniższej macierzy

$$\mathbf{T}_s = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & \dots \\ 1 & a & a^2 & 0 & 0 & \dots \\ 1 & a^2 & a & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{3} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{3} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

W wyniku transformacji otrzymuje się układ równań

$$\frac{d}{dt} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{L}_o^s + \mathbf{L}^s & \mathbf{M}^s(\varphi) \\ \mathbf{M}^s(\varphi)^T & \mathbf{L}_{ow} + \mathbf{L}_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}^s \\ \mathbf{i}_w \end{bmatrix} \right) +$$

$$+ \begin{bmatrix} \mathbf{R}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_s \\ \mathbf{u}_w \end{bmatrix} \quad (6)$$

gdzie: $\mathbf{L}_\sigma^s + \mathbf{L}^s = \mathbf{T}_s(\mathbf{L}_{\sigma s} + \mathbf{L}_s)\mathbf{T}_s^{-1}$

$$\mathbf{M}^s(\varphi) = \mathbf{T}_s \mathbf{M}(\varphi) = \sum_{\rho=-\infty}^{\infty} \mathbf{M}_\rho e^{j\rho\varphi}$$

$$\mathbf{R}^s = \mathbf{T}_s(\mathbf{R}_s)\mathbf{T}_s^{-1}$$

3. Analiza widmowa prądów

Na podstawie równań (6) przeprowadzono analizę stanu ustalonego przy założeniu:

- synchronicznej prędkości obrotowej turbogeneratora $\varphi = \Omega t + 270 + \vartheta$ (ϑ - kąt mocy),
- zasilaniu faz stojana symetrycznym, monoharmonicznym układem napięć, którego składowe symetryczne mają postać

$$u_s^1(t) = U_s e^{j\Omega t}, \quad u_s^2(t) = (u_s^1(t))^*$$

- zasilaniu uzwojenia wzbudzenia napięciem stałym $u_w(t) = U_w$.

W tych warunkach wszystkie prądy w turbogeneratorsie można przewidzieć jako okresowe funkcje czasu. W szczególności składowe symetryczne prądów faz stojana, przy braku składowej zerowej $i_s^0(t) = 0$, można przewidzieć w postaci

$$i_s^1(t) = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_a(t) + a i_b(t) + a^2 i_c(t)) = \sum_{\rho=-\infty}^{\infty} I_{s,\rho}^1 e^{j\rho\Omega t},$$

$$i_s^2(t) = (i_s^1(t))^* \quad (7)$$

a prąd wzbudzenia w postaci

$$i_w(t) = \sum_{\rho=-\infty}^{\infty} I_{w,\rho} e^{j\rho\Omega t} \quad (8)$$

Inne prądy należy przewidywać także w analogicznej postaci szeregów Fouriera.

Równania bilansu harmonicznym mają postać nieskończonego układu równań algebraicznych wiążących współczynniki Fouriera napięć, prądów oraz indukcyjności

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_s \\ \mathbf{U}_w \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \mathbf{R}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_w \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Omega} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \boldsymbol{\Omega} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{M} \\ \mathbf{M}^T & \mathbf{L}_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_s \\ \mathbf{I}_w \end{bmatrix} \quad (9)$$

w którym:

$$\mathbf{U}_s = [\dots \ 0 \ U_1 \ 0 \ U_{-1} \ 0 \ \dots]^T$$

$$\mathbf{U}_w = [\dots \ 0 \ U_0 \ 0 \ \dots]^T$$

$$\mathbf{I}_s = [\dots \ I_{s,1} \ I_{s,0} \ I_{s,-1} \ \dots]^T$$

$$\mathbf{I}_w = [\dots \ I_{w,1} \ I_{w,0} \ I_{w,-1} \ \dots]^T$$

$$\boldsymbol{\Omega} = \text{diag}[\dots \ \Omega E \ 0 \ -\Omega E \ \dots]$$

$$\mathbf{L}_s = \text{diag}[\dots \ \mathbf{L}_c^s \ \mathbf{L}_c^s \ \mathbf{L}_c^s \ \dots],$$

$$\mathbf{L}_w = \text{diag}[\dots \ \mathbf{L}_{cw} \ \mathbf{L}_{cw} \ \mathbf{L}_{cw} \ \dots],$$

$$\vdots \quad \vdots \quad \vdots$$

$$\dots \ \mathbf{0} \ \mathbf{M}_1 \ \mathbf{M}_2 \ \dots$$

$$\mathbf{M} = \dots \ \mathbf{M}_{-1} \ \mathbf{0} \ \mathbf{M}_1 \ \dots$$

$$\dots \ \mathbf{M}_{-2} \ \mathbf{M}_{-1} \ \mathbf{0} \ \dots$$

$$\vdots \quad \vdots \quad \vdots$$

$$\mathbf{L}_c^s = \mathbf{L}_\sigma^s + \mathbf{L}^s, \quad \mathbf{L}_{cw} = \mathbf{L}_{\sigma w} + \mathbf{L}_w$$

$$\mathbf{R}_s = \text{diag}[\dots \ \mathbf{R}^s \ \mathbf{R}^s \ \mathbf{R}^s \ \dots]$$

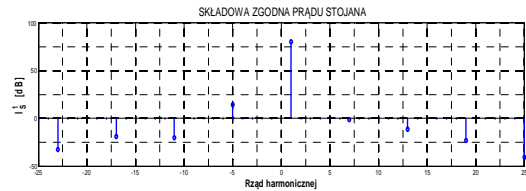
$$\mathbf{R}_w = \text{diag}[\dots \ \mathbf{R}_w \ \mathbf{R}_w \ \mathbf{R}_w \ \dots]$$

Układ równań (9), ograniczony do wymiarów skończonych, umożliwia określenie widma prądów wszystkich uzwojeń.

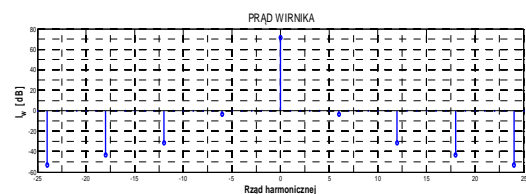
4. Wyniki obliczeń testowych dla przypadków zwarć wewnętrznych

Model matematyczny turbogeneratorsa opisany równaniami (6) wykorzystano do poglądowej analizy przypadków zwarć wewnętrznych w uzwojeniu stojana i wzbudzenia. Do obliczeń wykorzystano szacunkowe dane konstrukcyjne ze względu na brak dostępu do rzeczywistych danych konstrukcyjnych. W związku z tym wyniki obliczeń mają poglądowy charakter i ukazują jedynie możliwości prezentowanego podejścia.

Widma Fouriera symetrycznego turbogeneratorsa pracującego w stanie bliskim znamionowemu przedstawiono na Rys. 3a,b.



Rys. 3a Widmo składowej $i_s^1(t)$ prądów stojana



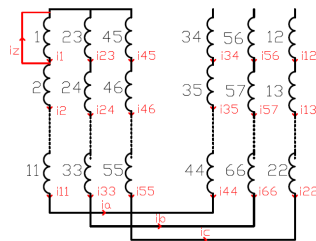
Rys. 3a Widmo prądu wzbudzenia

Widmo składowej $i_s^1(t)$, reprezentowanej zespolonym szeregiem Fouriera zawiera harmoniczne o numerach ujemnych i dodatnich. Dodatnie odpowiadają zgodnej kolejności prądów

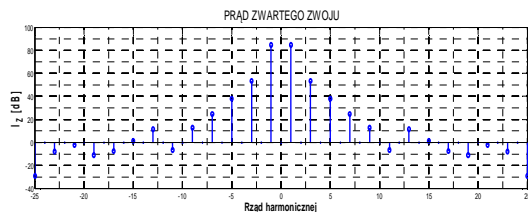
dów fazowych, ujemne kolejności przeciwnej. Widmo prądu wzbudzenia zawiera sprzężone harmoniczne dodatnie i ujemne, co wynika z jego reprezentacji zespolonym szeregiem Fouriera. Na tych i pozostałych rysunkach przyjęto skalę w dB. Wartości prążków widma obliczono z wzoru

$$I_h [\text{dB}] = 20 \log (I_h [\text{A}])$$

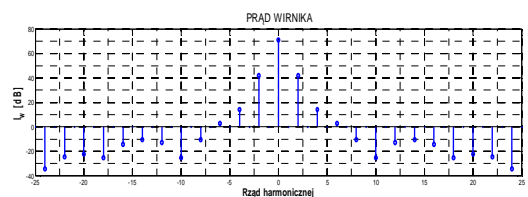
Na Rys. 4a,b przedstawiono widma prądów przy zwarciu cewki '1' w fazie 'a' (Rys.4): składowej $i_s^1(t)$ prądów stojana, prądu zwartej cewki oraz prądu wzbudzenia.



Rys. 4 Uzwojenie stojana ze zwartą cewką '1' (zaznaczono numery cewek)

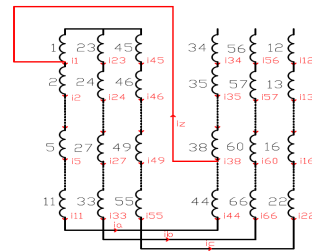


Rys. 4a Widmo składowej $i_s^1(t)$ prądów stojana oraz prądu zwartej cewki



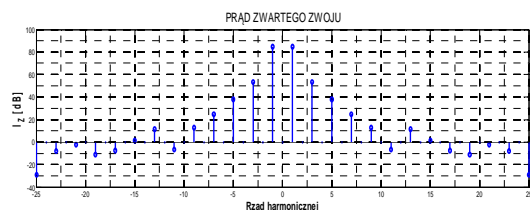
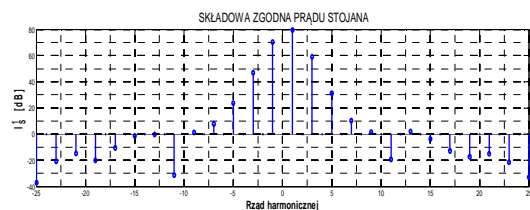
Rys. 4b Widmo prądu wzbudzenia przy zwarciu cewki '1' w fazie 'a'

Kolejne obliczenia wykonano dla zwarciu cewek stojana umieszczonych w żłobku '1', co odpowiada schematowi połączeń przedstawionemu na Rys. 5.

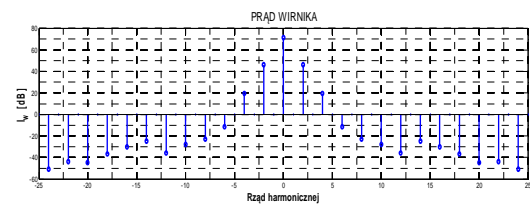


Rys. 5 Schemat połączeń przy zwarciu cewek uzwojenia stojana w żłobku '1'

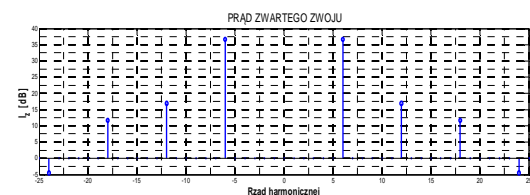
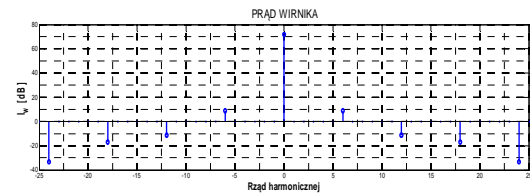
Widma prądów dla tego przypadku przedstawiono na Rys. 5a,b



Rys. 5a Widmo składowej $i_s^1(t)$ prądów stojana oraz prądu w zwartych cewkach



Rys. 5b Widmo prądu wzbudzenia przy zwarciu cewek w żłobku '1'



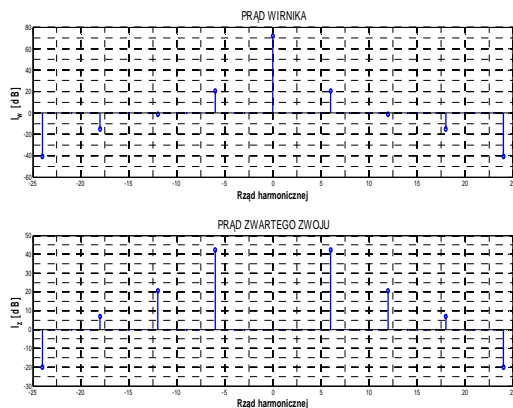
Rys. 6a Widmo prądu wzbudzenia oraz zwartej cewki '1' tego uzwojenia

Kolejne obliczenia wykonano dla zwarcie cevek w uzwojeniu wzbudzenia. Na Rys 6a,b przedstawiono widma prądów w przypadku zwarcia cewki '1' (Rys.2) o najkrótszym poskoku. Rys. 6a obrazuje widmo uzwojenia wzbudzenia oraz zwartego zwoju, a Rys. 6b prezentuje widmo składowej $i_s^1(t)$ prądów faz stojana

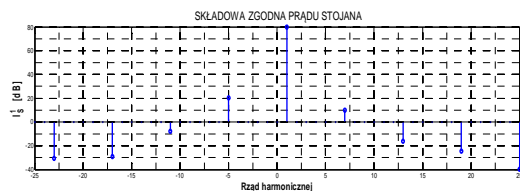


Rys. 6b Widmo składowej $i_s^1(t)$ prądów stojana przy zwarcie cewki '1' uzwojenia wzbudzenia.

W kolejnym teście określono widma prądów przy zwarcie cewki '8' uzwojenia wzbudzenia o najdłuższym poskoku. Przedstawiono je na Rys. 7a,b w układzie jak poprzednio.



Rys. 7a Widmo prądu wzbudzenia oraz zwartej cewki '8' tego uzwojenia



Rys. 7b Widmo składowej $i_s^1(t)$ prądów stojana przy zwarcie cewki '8' uzwojenia wzbudzenia.

Analiza widm przedstawionych na powyższych rysunkach prowadzi do wniosku, że występują istotne różnice jakościowe i ilościowe zarówno w widmach prądów stojana jak i

wzbudzenia. Można zatem poszukiwać relacji między typem uszkodzenia wewnętrznego a charakterem oraz cechami ilościowymi widm. Takich analiz nie przeprowadzono gdyż w modelu nie uwzględniano uzwojeń i obwodów elementów tłumiących na wirniku oraz przyjęto szacunkowe dane konstrukcyjne do obliczeń, co czyni wyniki obliczeń prezentowane w tej pracy jedynie poglądowymi.

5. Wnioski

W pracy przedstawiono metodologię, która może być wykorzystana dla określania widm prądów turbogenerators w przypadkach wewnętrznych uszkodzeń uzwojeń. Jej stosowanie wymaga jednak ścisłej współpracy z wytwórcami i projektantami turbogeneratorów ze względu na dostępność danych konstrukcyjnych potrzebnych do tak szczegółowego modelowania turbogenerators. Analiza takich widm może stać się podstawą dla algorytmów diagnostycznych z powodzeniem wykorzystywanych w maszynach indukcyjnych.

Literatura:

- [1] Latek W.: *Turbogeneratory*, WNT, Warszawa, 1973.
- [2] Kulig T.S., Buckley, Lambrecht D., Liese M.: A New Approach to Determine Transient Generator Winding and Damper Currents in Case of Internal and External Faults and Abnormal Operation, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol.5, No.1,1990, pp.70-78.
- [3] Lee Y.J., Kim H.D., Ju Y.H.: Development of Shorted Turn Diagnosis System for Generator Rotor Winding, *Trans. Korean Inst. Elec. Eng.*, Vol. 48, No.11, 1999
- [4] Sobczyk T.: Metodyczne aspekty modelowania matematycznego maszyn indukcyjnych, WNT, 2004.
- [5] Przybysz J.: *Turbogeneratory. Zagadnienia eksploatacyjne*, Instytut Energetyki, Warszawa 2004.
- [6] Boldea I.: *Synchronous Generators*, CRC Taylor & Francis Group, 2006.
- [7] Rosendahl J., Kulig S.T.: Numerical Field Calculation of Stator Winding Faults in Synchronous Machines, *COMPEL*, Vol. 28, No. 6, 2009, pp.1662-1671.

Autorzy:

Kamil Grzybacz, mgr inż., dyplomant,
Konrad Łatak, mgr inż., dyplomant,
Tadeusz J. Sobczyk, prof. dr hab. inż.
Politechnika Krakowska, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii, Katedra Diagnostyki Maszyn Elektrycznych, Kraków, 31-155, ul. Warszawska 24,
tadeusz.sobczyk@pk.edu.pl