ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1997
Seria: ELEKTRYKA z. 159 Nr kol 1369

Jerzy KUDŁA
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych

MODEL MATEMATYCZNY ORAZ WŁAŚCIWOŚCI GENERATORÓW SYNCHRONICZNYCH W STANACH DYNAMICZNYCH PRZY UWZGLĘDNIENIU ZJAWISKA NASYCENIA DLA POLA MAGNETYCZNEGO GŁÓWNEGO

Streszczenie. Przedstawiono układ równań różniczkowo-algebraicznych opisujących stan dynamiczny maszyny synchronicznej, w których za pomocą nieliniowych syntetycznych charakterystyk sprzężeń magnetycznych uwzględniono zjawisko nasycenia rdzeni ferromagnetycznych maszyny przez pole magnetyczne główne. Definiując statyczne i dynamiczne indukcyjności magnesujące maszyny i wyrażając je za pomocą syntetycznych charakterystyk sprzężeń magnetycznych sformułowano układ równań różniczkowych napięciowo-prądowych będący podstawą badań symulacyjnych i analiz.

MATHEMATICAL MODEL AND DYNAMIC PROPERTIES OF THE SYNCHRONOUS GENERATORS WHEN TAKING INTO ACCOUNT SATURATION EFFECT FOR THE MAIN MAGNETIC FIELD

Summary. The system of differential-algebraic equations which describe the dynamic state of a synchronous machine has been presented. Saturation of the machine magnetic cores by the main magnetic field has been taken into consideration in these equations by means of the nonlinear synthetic characteristics of magnetic flux linkages. Having defined the static and dynamic magnetizing inductances and having expressed them by the synthetic characteristics of magnetic flux linkages the system of differential equations (voltage-current equations) has been formulated. Computations and investigations based on this equations have been performed.

1. WPROWADZENIE

Analiza właściwości dynamicznych generatorów synchronicznych pracujących w złożonych systemach elektroenergetycznych dokonywana jest zazwyczaj na podstawie wyników badań symulacyjnych, odtwarzających różnorodne stany pracy systemu, w tym stany awaryjne. Wiarygodność przeprowadzanych badań w dużym stopniu zależy od dokładności odwzorowania zjawisk elektrodynamicznych występujących w elementach składowych systemu elektroenergetycznego. W ostatnich kilkunastu latach w wielu ośrodkach naukowych w kraju i za granicą prowadzone są prace badawcze zmierzające do poprawy dokładności obliczeń stanów dynamicznych systemów elektroenergetycznych poprzez między innymi udokładnienie modeli matematycznych elementów składowych systemu, w tym generatorów synchronicznych. Wśród opublikowanych wyników badań dotyczących modelowania generatorów synchronicznych wyróżnić można prace zmierzające do uwzględnienia zjawiska nasycenia w obwodowych modelach matematycznych generatorów synchronicznych [1], [5]. W pracach tych, bazując na heurystycznej zasadzie rozdziału wypadkowego pola magnetycznego w maszynie na pole główne i pola rozproszeń, uwzględnia się w sposób oddzielny zjawisko nasycenia rdzeni magnetycznych maszyny przez pole magnetyczne główne oraz przez pole rozproszenia uzwojeń stojana, pomijając to zjawisko dla pól rozproszeń uzwojeń i obwodów elektrycznych w wirniku. W obwodowym modelu matematycznym maszyny synchronicznej zjawisko nasycania się rdzeni magnetycznych przez te pola uwzględnia się za pomocą nieliniowych charakterystyk sprzężeń magnetycznych tych pól z uzwojeniami i obwodami elektrycznymi maszyny. Charakterystyki te wyznacza się w sposób pomiarowy bądź też oblicza na podstawie rozkładów przestrzennych odpowiednich pól magnetycznych w maszynie wyznaczonych metodą elementów skończonych. W artykule przedstawiono model matematyczny maszyny synchronicznej, w którym nieliniowe charakterystyki sprzężeń magnetycznych pola magnetycznego głównego z obwodami elektrycznymi maszyny w osi d i q wyrażono za pomocą niewielkiej liczby syntetycznych charakterystyk sprzężeń magnetycznych [3]. Syntetyczne charakterystyki wykorzystano do obliczenia statycznych i dynamicznych indukcyjności magnesujących maszyny, za pomocą których sformułowano ostateczny układ równań napięciowo-prądowych maszyny. Równania te wykorzystano do badań symulacyjnych, których zasadniczym celem było określenie wpływu zjawiska nasycenia na przebiegi czasowe podstawowych wielkości elektrodynamicznych generatora synchronicznego w typowych stanach nieustalonych. Badania symulacyjne przeprowadzono dla turbogeneratora o mocy 210 MW.

2. RÓWNANIA ALGEBRAICZNO-RÓŻNICZKOWE OPISUJĄCE STAN DYNAMICZNY MASZYNY SYNCHRONICZNEJ. SYNTETYCZNE CHARAKTERYSTYKI SPRZĘŻEŃ MAGNETYCZNYCH.

Przy formułowaniu układu równań różniczkowo-algebraicznych opisujących stany dynamiczne maszyny synchronicznej, w których uwzględnia się zjawisko nasycenia dla pola magnetycznego głównego, oprócz tradycyjnych założeń stosowanych przy opracowywaniu modeli matematycznych tych maszyn dodatkowo przyjęto, że:

- charakterystyki magnesowania rdzeni magnetycznych stojana i wirnika są nieliniowe i jednoznaczne,
- pola magnetyczne rozproszeń jako niezależne od pola magnetycznego głównego nie mają wpływu na zjawisko nasycania się rdzeni magnetycznych maszyny przez pole magnetyczne główne,
- pole magnetyczne główne w maszynie wytworzone jest przez uzwojenia magnesujące umieszczone w żłobkach stojana, który jest nieruchomy względem wirnika,
- jedynie podstawowa harmoniczna przestrzenna składowej promieniowej indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej maszyny (określona na łuku wyznaczonym przez promień zewnętrzny wirnika) sprzęga się z uzwojeniami stojana i wirnika.

Przy przyjętych założeniach równania opisujące stan dynamiczny maszyny synchronicznej, w której w wirniku w osi d uwzględniono dwa, a w osi q trzy zastępcze obwody tłumiące [1], w układzie współrzędnych d i q przyjmują postać:

- układu równań różniczkowych opisujących stan dynamiczny obwodów elektrycznych maszyny osi d i q

-oś d

$$U_d = RI_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega\Psi_q \,, \qquad u_f^{\bullet} = R_f^{\bullet} i_f^{\bullet} + \frac{d\Psi_f^{\bullet}}{dt},$$

$$0 = R_{D1}^{\bullet} i_{D1}^{\bullet} + \frac{d\Psi_{D1}^{\bullet}}{dt}, \qquad 0 = R_{D2}^{\bullet} i_{D2}^{\bullet} + \frac{d\Psi_{D2}^{\bullet}}{dt},$$

-oś q (1)

$$U_q = RI_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega\Psi_d \,, \qquad 0 = R_{Q1}^{\bullet} \cdot i_{Q1}^{\bullet} + \frac{d\Psi_{Q1}^{\bullet}}{dt},$$

$$0 = R_{Q2}^{\bullet} i_{Q2}^{\bullet} + \frac{d\Psi_{Q2}^{\bullet}}{dt} \,, \qquad 0 = R_{Q3}^{\bullet} i_{Q3}^{\bullet} + \frac{d\Psi_{Q3}^{\bullet}}{dt}.$$

- układu równań algebraicznych nieliniowych określających relacje pomiędzy sprzężeniami magnetycznymi a prądami

- oś d

$$\Psi_d = L_\sigma I_d + \Psi_{md}\,, \qquad \Psi_f^* = L_{f\sigma} i_f^* + L_{\sigma fD12}^*\left(i_f^* + i_{D1}^* + i_{D2}^*\right) + \Psi_{md}\,,$$

$$\Psi_{D1}^* = L_{\sigma D1}^* i_{D1}^* + L_{\sigma fD12}^*\left(i_f^* + i_{D1}^* + i_{D2}^*\right) + \Psi_{md}\,,$$

$$\Psi_{D2}^* = L_{\sigma D2}^* i_{D2}^* + L_{\sigma fD12}^*\left(i_f^* + i_{D1}^* + i_{D2}^*\right) + \Psi_{md}\,,$$

- oś q (2)

$$\Psi_q = L_\sigma I_q + \Psi_{mq}\,, \qquad \Psi_{Q1}^* = L_{\sigma Q1} i_{Q1}^* + \Psi_{mq}\,,$$

$$\Psi_{Q2}^* = L_{\sigma Q2}^* i_{Q2}^* + \Psi_{mq}\,, \qquad \Psi_{Q3}^* = L_{\sigma Q3}^* i_{Q3}^* + \Psi_{mq}\,,$$

- równania ruchu mechanicznego

$$\frac{J}{p}\frac{d\omega}{dt} = p\left(\Psi_{md} I_q - \Psi_{mq} I_d\right) + M_m\,. \tag{3}$$

Uwzględniając, że tylko podstawowa harmoniczna przestrzenna składowej promieniowej indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej maszyny sprzęga się z obwodami elektrycznymi maszyny w osiach d i q, sprzężenia magnetyczne pola głównego z obwodami elektrycznymi maszyny można przedstawić za pomocą nieliniowych funkcji zależnych od modułu i argumentu fazora przestrzennego prądu magnesującego [3], w konsekwencji więc zachodzi

$$\Psi_{md} = \Psi_{md}(I_m, \gamma_m)\,, \qquad \Psi_{mq} = \Psi_{mq}(I_m, \gamma_m)\,, \tag{4}$$

gdzie:

$$I_m = \sqrt{\left(I_{md}\right)^2 + \left(I_{mq}\right)^2}\,, \qquad \gamma_m = arctg\left(\frac{I_{mq}}{I_{md}}\right),$$

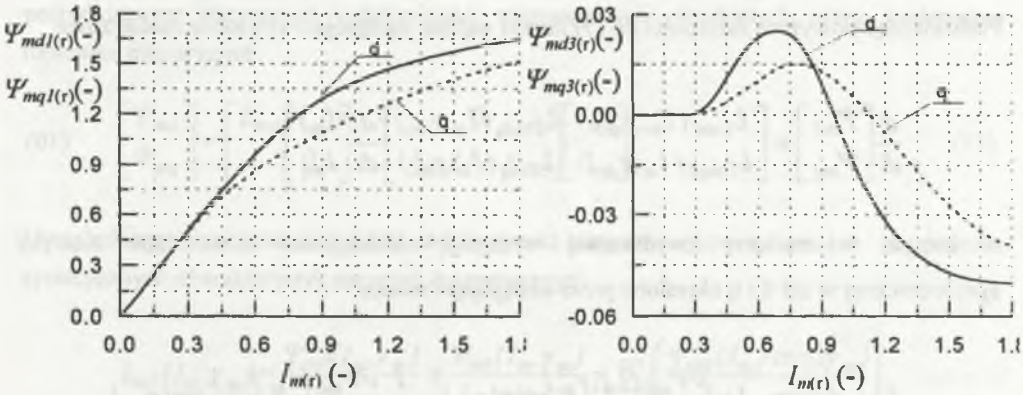
$$I_{md} = I_d + i_f^* + i_{D1}^* + i_{D2}^*\,, \qquad I_{mq} = I_q + i_{Q1}^* + i_{Q2}^* + i_{Q3}^*\,. \tag{5}$$

Uwzględniając przedstawione w [3] rozważania, funkcje te można wyrazić za pośrednictwem syntetycznych charakterystyk sprzężeń magnetycznych, korzystając z zależności

$$\Psi_{md}(I_m, \gamma_m) = \sum_{i=1,3} \Psi_{mdi}(I_m) cos(i\gamma_m)\,,$$

$$\Psi_{mq}(I_m, \gamma_m) = \sum_{i=1,3} \Psi_{mqi}(I_m) sin(i\gamma_m)\,. \tag{6}$$

Syntetyczne charakterystyki sprzężeń magnetycznych pola magnetycznego głównego turbogeneratora o mocy 210 MW przedstawiono na rys.1.



Rys. 1. Syntetyczne charakterystyki sprzężeń magnetycznych pola magnetycznego głównego
Fig. 1. Synthetic characteristics of the main magnetic flux linkages

3. STATYCZNE I DYNAMICZNE INDUKCYJNOŚCI MAGNESUJĄCE

Przy formułowaniu układu równań różniczkowych napięciowo-prądowych generatora synchronicznego zachodzi potrzeba obliczenia pochodnych względem czasu sprzężeń magnetycznych pola magnetycznego głównego oraz wyrażenia ich za pośrednictwem odpowiednich prądów i ich pochodnych względem czasu. Uwzględniając, że w stanach nieustalonych zarówno moduł, jak i argument fazora przestrzennego prądu magnesującego są funkcjami czasu, otrzymuje się

$$\frac{d\Psi_{md}}{dt} = \frac{\partial \Psi_{md}(I_m,\gamma_m)}{\partial I_m}\frac{dI_m}{dt} + \frac{\partial \Psi_{md}(I_m,\gamma_m)}{\partial \gamma_m}\frac{d\gamma_m}{dt},$$

$$\frac{d\Psi_{mq}}{dt} = \frac{\partial \Psi_{mq}(I_m,\gamma_m)}{\partial I_m}\frac{dI_m}{dt} + \frac{\partial \Psi_{mq}(I_m,\gamma_m)}{\partial \gamma_m}\frac{d\gamma_m}{dt}. \tag{7}$$

Uwzględniając dalej, że

$$\underline{I}_m = I_m e^{j\gamma_m}, \qquad \underline{I}_m^* = I_m e^{-j\gamma_m}, \tag{8}$$

wyznacza się

$$\frac{dI_m}{dt} = Re\left\{e^{-j\gamma_m}\frac{d\underline{I}_m}{dt}\right\}, \qquad \frac{d\gamma_m}{dt} = \frac{1}{I_m} Im\left\{e^{-j\gamma_m}\frac{d\underline{I}_m}{dt}\right\}. \tag{9}$$

Podstawiając powyższe zależności do (7) można napisać następujące równanie macierzowe

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\Psi_{md}\\ \Psi_{mq}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{Dmd}(I_m,\gamma_m) & L_{Dmdq}(I_m,\gamma_m)\\ L_{Dmqd}(I_m,\gamma_m) & L_{Dmq}(I_m,\gamma_m)\end{bmatrix}\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}I_{md}\\ I_{mq}\end{bmatrix}, \tag{10}$$

w którym w macierzy kwadratowej występują indukcyjności dynamiczne maszyny synchronicznej w osi d i q określone przez następujące relacje:

$$L_{Dmd}(I_m,\gamma_m) = \frac{\partial\Psi_{md}(I_m,\gamma_m)}{\partial I_m}\cos(\gamma_m) - \frac{1}{I_m}\frac{\partial\Psi_{md}(I_m,\gamma_m)}{\partial\gamma_m}\sin(\gamma_m),$$

$$L_{Dmq}(I_m,\gamma_m) = \frac{\partial\Psi_{mq}(I_m,\gamma_m)}{\partial I_m}\sin(\gamma_m) + \frac{1}{I_m}\frac{\partial\Psi_{mq}(I_m,\gamma_m)}{\partial\gamma_m}\cos(\gamma_m),$$

$$L_{Dmdq}(I_m,\gamma_m) = \frac{\partial\Psi_{md}(I_m,\gamma_m)}{\partial I_m}\sin(\gamma_m) + \frac{1}{I_m}\frac{\partial\Psi_{md}(I_m,\gamma_m)}{\partial\gamma_m}\cos(\gamma_m), \tag{11}$$

$$L_{Dmqd}(I_m,\gamma_m) = \frac{\partial\Psi_{mq}(I_m,\gamma_m)}{\partial I_m}\cos(\gamma_m) - \frac{1}{I_m}\frac{\partial\Psi_{mq}(I_m,\gamma_m)}{\partial\gamma_m}\sin(\gamma_m).$$

Uwzględniając dalej zależności (6), indukcyjności dynamiczne maszyny można wyznaczyć za pomocą syntetycznych charakterystyk sprzężeń magnetycznych

$$L_{Dmd}(I_m,\gamma_m) = \sum_{i=1,3}\left(\frac{d\Psi_{mdi}(I_m)}{dI_m}\cos(i\gamma_m)\cos(\gamma_m) + i\frac{\Psi_{mdi}(I_m)}{I_m}\sin(i\gamma_m)\sin(\gamma_m)\right),$$

$$L_{Dmq}(I_m,\gamma_m) = \sum_{i=1,3}\left(\frac{d\Psi_{mqi}(I_m)}{dI_m}\sin(i\gamma_m)\sin(\gamma_m) + i\frac{\Psi_{mqi}(I_m)}{I_m}\cos(i\gamma_m)\cos(\gamma_m)\right),$$

$$L_{Dmdq}(I_m,\gamma_m) = \sum_{i=1,3}\left(\frac{d\Psi_{mdi}(I_m)}{dI_m}\cos(i\gamma_m)\sin(\gamma_m) + i\frac{\Psi_{mdi}(I_m)}{I_m}\sin(i\gamma_m)\cos(\gamma_m)\right),$$

$$L_{Dmqd}(I_m,\gamma_m) = \sum_{i=1,3}\left(\frac{d\Psi_{mqi}(I_m)}{dI_m}\sin(i\gamma_m)\cos(\gamma_m) + i\frac{\Psi_{mqi}(I_m)}{I_m}\cos(i\gamma_m)\sin(\gamma_m)\right). \tag{12}$$

Równocześnie, aczkolwiek niekoniecznie, sprzężenia magnetyczne pola magnetycznego głównego z obwodami elektrycznymi maszyny w osiach d i q przedstawić można za pośrednictwem statycznych indukcyjności magnesujących określonych przez następujące równanie macierzowe

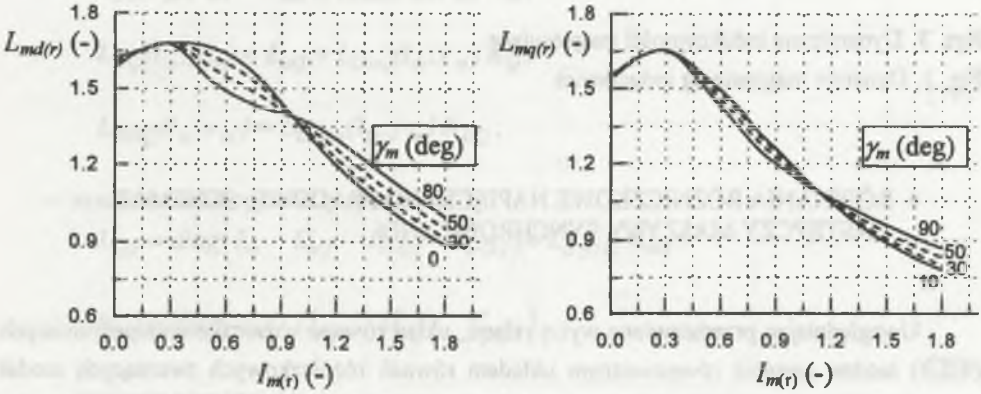
$$\begin{bmatrix} \Psi_{md} \\ \Psi_{mq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{md}(I_m, \gamma_m) & 0 \\ 0 & L_{mq}(I_m, \gamma_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{md} \\ I_{mq} \end{bmatrix}. \tag{13}$$

Uwzględniając ponownie relacje (6), indukcyjności statyczne wyznaczyć można za pomocą syntetycznych charakterystyk sprzężeń magnetycznych

$$L_{md}(I_m, \gamma_m) = \frac{\Psi_{md}(I_m, \gamma_m)}{I_{md}} = \frac{\Psi_{md}(I_m, \gamma_m)}{I_m \cos(\gamma_m)} = \sum_{i=1,3} \left(\frac{\Psi_{mdi}(I_m)}{I_m} \frac{\cos(i\gamma_m)}{\cos(\gamma_m)} \right),$$

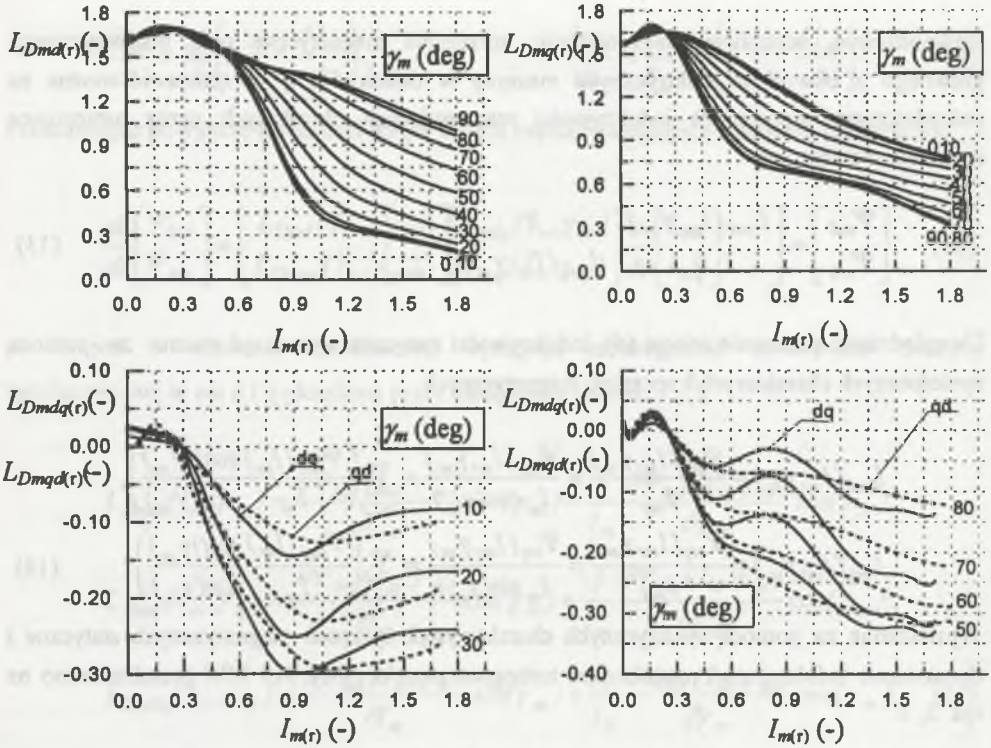
$$L_{mq}(I_m, \gamma_m) = \frac{\Psi_{mq}(I_m, \gamma_m)}{I_{md}} = \frac{\Psi_{mq}(I_m, \gamma_m)}{I_m \sin(\gamma_m)} = \sum_{i=1,3} \left(\frac{\Psi_{mqi}(I_m)}{I_m} \frac{\sin(i\gamma_m)}{\sin(\gamma_m)} \right). \tag{14}$$

Wyznaczone za pomocą syntetycznych charakterystyk sprzężeń magnetycznych statyczne i dynamiczne indukcyjności magnesujące turbogeneratora o mocy 210 MW przedstawiono na rys. 2, 3.



Rys. 2. Statyczne indukcyjności magnesujące

Fig. 2. Static magnetizing inductances



Rys. 3. Dynamiczne indukcyjności magnesujące

Fig. 3. Dynamic magnetizing inductances

4. RÓWNANIA RÓŻNICZKOWE NAPIĘCIOWO-PRĄDOWE. SCHEMAT ZASTĘPCZY MASZYNY SYNCHRONICZNEJ

Uwzględniając przedstawione wyżej relacje, układ równań różniczkowo-algebraicznych (1,2,3) można zastąpić równoważnym układem równań różniczkowych tworzących model matematyczny maszyny synchronicznej, w którym uwzględniono zjawisko nasycenia dla pola magnetycznego

$$\begin{bmatrix} U_D \\ U_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_D & -\Omega_Q L_Q(I_m,\gamma_m) \\ \Omega_D L_D(I_m,\gamma_m) & R_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_D \\ I_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{DD}(I_m,\gamma_m) & L_{DDQ}(I_m,\gamma_m) \\ L_{DDQ}(I_m,\gamma_m)^T & L_{DQ}(I_m,\gamma_m) \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_D \\ I_Q \end{bmatrix},$$

$$\frac{J}{p}\frac{d\omega}{dt} = p\left(L_{md}(I_m,\gamma_m) I_{md} I_q - L_{mq}(I_m,\gamma_m) I_{mq} I_d\right) + M_m, \tag{15}$$

gdzie wektory i macierze występujące w powyższym układzie równań przyjmują postać:

– wektory

$$U_D = \begin{bmatrix} U_d & u_f^* & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \qquad I_D = \begin{bmatrix} I_d & i_f^* & i_{D1}^* & i_{D2}^* \end{bmatrix}^T,$$

$$U_Q = \begin{bmatrix} U_q & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \qquad I_Q = \begin{bmatrix} I_q & i_{Q1}^* & i_{Q2}^* & i_{Q3}^* \end{bmatrix}^T, \tag{16}$$

– macierze rezystancji

$$R_D = diag\begin{pmatrix} R & R_f^* & R_{D1}^* & R_{D2}^* \end{pmatrix}, \qquad R_Q = diag\begin{pmatrix} R & R_{Q1}^* & R_{Q2}^* & R_{Q3}^* \end{pmatrix}, \tag{17}$$

– macierze indukcyjności statycznych maszyny, zawierające indukcyjności magnesujące statyczne zależne od stanu nasycenia rdzeni magnetycznych stojana i wirnika

$$\begin{aligned} L_D(I_m,\gamma_m) &= L_{\sigma D} + L_{md}(I_m,\gamma_m)K_D, \\ L_Q(I_m,\gamma_m) &= L_{\sigma Q} + L_{mq}(I_m,\gamma_m)K_Q, \end{aligned} \tag{18}$$

– macierze indukcyjności dynamicznych maszyny, zawierające indukcyjności magnesujące dynamiczne zależne od stanu nasycenia rdzeni magnetycznych stojana i wirnika

$$\begin{aligned} L_{DD}(I_m,\gamma_m) &= L_{\sigma D} + L_{Dmd}(I_m,\gamma_m)K_D, \\ L_{DQ}(I_m,\gamma_m) &= L_{\sigma Q} + L_{Dmq}(I_m,\gamma_m)K_Q, \\ L_{DDQ}(I_m,\gamma_m) &= L_{Dmdq}(I_m,\gamma_m)K_{DQ}, \end{aligned} \tag{19}$$

– macierze indukcyjności rozproszenia

$$\begin{aligned} L_{\sigma D} &= diag\begin{pmatrix} L_\sigma & L_{\sigma f}^* & L_{\sigma D1}^* & L_{\sigma D2}^* \end{pmatrix} + L_{\sigma fD12}^* K_{\sigma D}, \\ L_{\sigma Q} &= diag\begin{pmatrix} L_\sigma & L_{\sigma Q1}^* & L_{\sigma Q2}^* & L_{\sigma Q3}^* \end{pmatrix}. \end{aligned} \tag{20}$$

– macierze pomocnicze

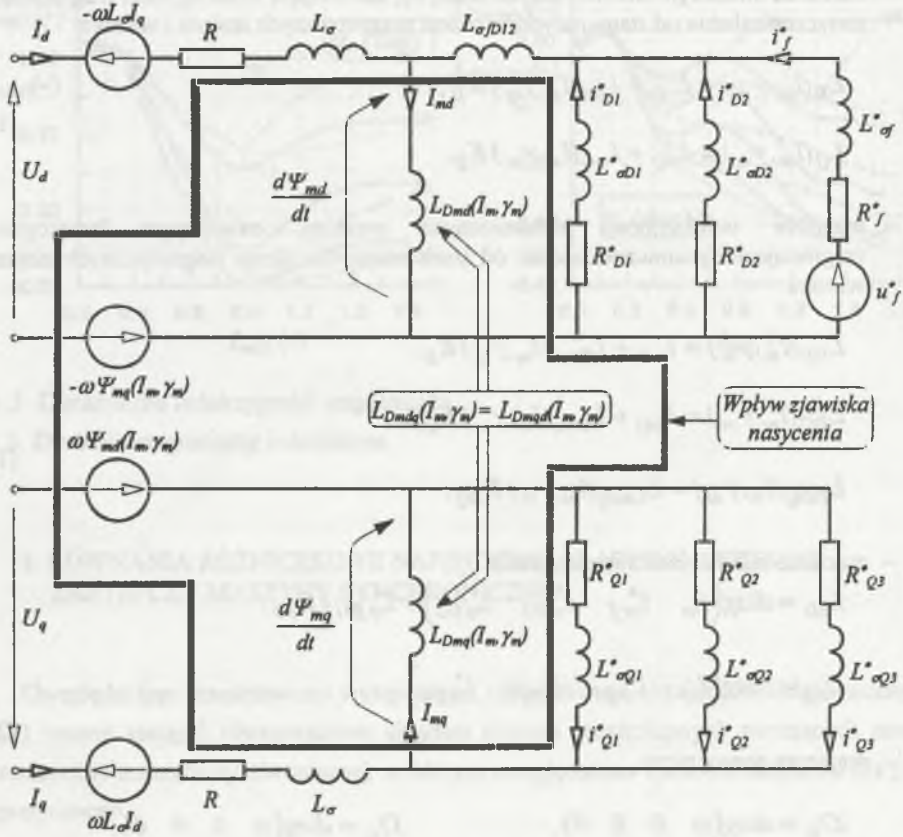
$$\Omega_D = diag\begin{pmatrix} \omega & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \qquad \Omega_Q = diag\begin{pmatrix} \omega & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$K_D = K_Q = K_{DQ} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \qquad K_{\sigma D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \tag{21}$$

Opracowany model matematyczny maszyny synchronicznej różni się od modelu matematycznego maszyny, w którym pominięto zjawisko nasycenia. Różnice między tymi modelami wynikają :

- z obecności różniących się między sobą macierzy indukcyjności statycznych i dynamicznych,
- z występowania dodatkowego sprzężenia magnetycznego między obwodami elektrycznymi maszyny w osi d i q,
- ze zmian wartości statycznych i dynamicznych indukcyjności magnesujących.

Wymienione wyżej różnice zaznaczono na schematach zastępczych maszyny synchronicznej przedstawionych na rys 4.



Rys. 4. Schemat zastępczy maszyny synchronicznej uwzględniający zjawisko nasycenia dla pola magnetycznego głównego

Fig.4. Equivalent circuit of the synchronous machine taking into account saturation by the main magnetic field

5. PRZYKŁADOWE WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

W oparciu o opracowany model matematyczny maszyny synchronicznej przeprowadzono badania symulacyjne typowych stanów nieustalonych dla generatora synchronicznego współpracującego z siecią sztywną. Przedmiotem badań był generator synchroniczny o następujących danych znamionowych:

$$S_N = 247 \text{ MV·A}, \quad P_N = 210 \text{ MW}, \quad U_N = 15{,}75 \text{ kV}, \quad I_N = 9{,}056 \text{ kA}$$

$$\cos(\phi_N) = 0{,}85, \quad I_{fji} = 940 \text{ A}, \quad T_j = 12 \text{ s}.$$

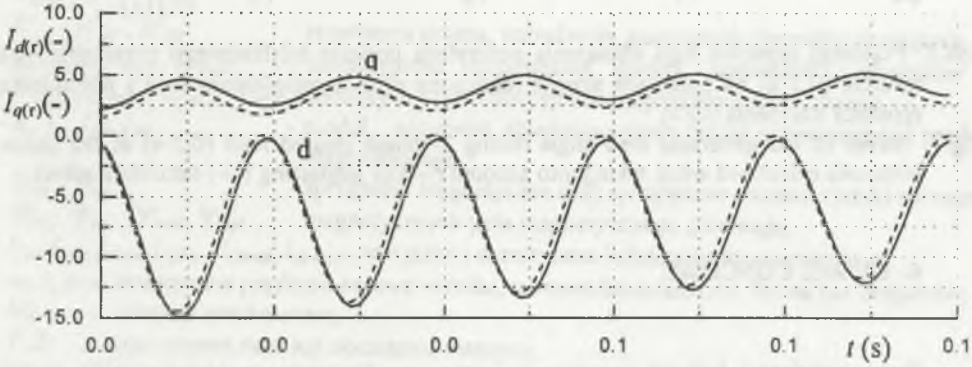
Jako parametry elektromagnetyczne przyjęto:

$$R_{(r)} = 0{,}00194; \; R^{\bullet}_{f(r)} = 0{,}00135; \; R^{\bullet}_{DI(r)} = 0{,}00319; \; R^{\bullet}_{QI(r)} = 0{,}00750;$$

$$L_{\sigma(r)} = 0{,}16895; \; L^{\bullet}_{\sigma f(r)} = 0{,}19555; \; L^{\bullet}_{\sigma DI(r)} = 0{,}03911; \; L^{\bullet}_{\sigma QI(r)} = 0{,}1041;$$

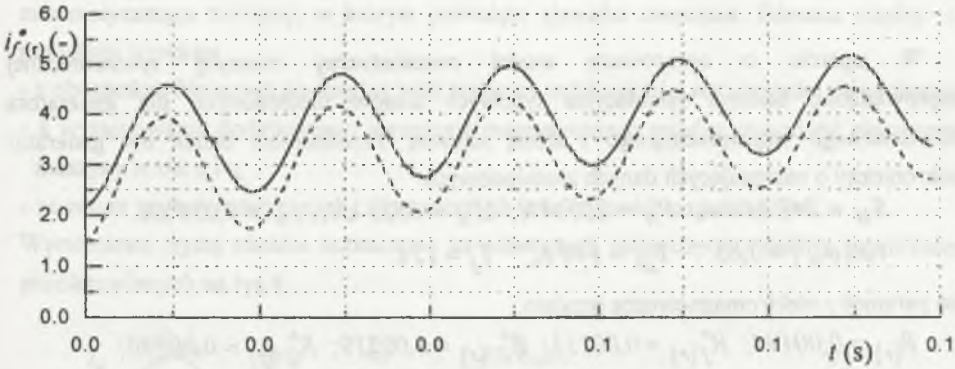
$L_{md(r)} = 1{,}682 \qquad L_{mq(r)} = o{,}1655$ - dla stanu nienasyconego.

Badania symulacyjne przeprowadzono przy uwzględnieniu i pominięciu zjawiska nasycenia w modelu matematycznym maszyny. W tym drugim przypadku jako indukcyjności magnesujące przyjęto indukcyjności maszyny obowiązujące dla stanu nienasyconego. Wybrane wyniki badań symulacyjnych przedstawiono na rys. 5, 6, 7. W celu uwydatnienia wpływu nasycenia na rysunkach tych przedstawiono wyniki obliczeń wykonane przy podwyższonym napięciu generatora synchronicznego ($U_{(r)}$=1,5). Obliczenia przeprowadzono dla generatora obciążonego mocą czynną $P_{(r)}$=-0,8 i bierną $Q_{(r)}$=-0,6.



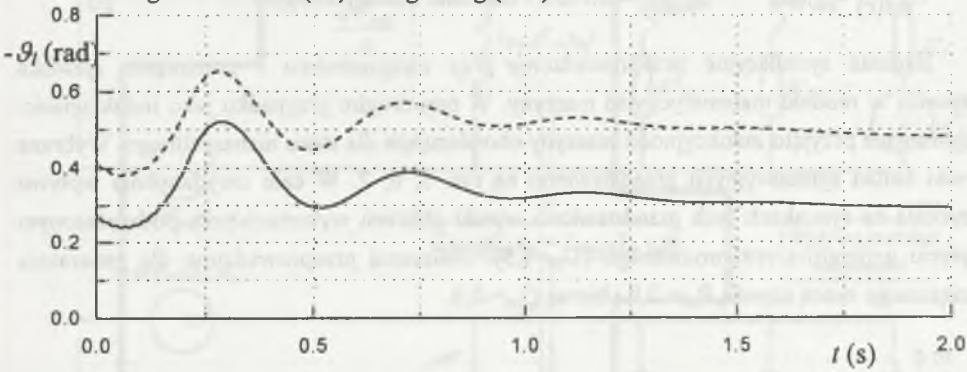
Rys.5. Przebiegi czasowe prądów stojana podczas trójfazowego zwarcia na zaciskach stojana, obliczone przy uwzględnieniu (---) i pominięciu zjawiska nasycenia (- - -)

Fig.5. Waves of the stator currents during 3-phase fault at the stator terminals calculated when taking into account (---) or neglecting (- - -) saturation effect



Rys.6. Przebiegi czasowe prądu wzbudzenia podczas trójfazowego zwarcia na zaciskach stojana obliczone przy uwzględnieniu (---) i pominięciu zjawiska nasycenia (- - -)

Fig.6. Waves of the field current during 3-phase fault at the stator terminals calculated when taking into account (---) or neglecting (- - -) saturation effect



Rys.7. Przebiegi czasowe kąta obciążenia generatora podczas trójfazowego przemijającego zwarcia (0,2 s) na zaciskach stojana, obliczone przy uwzględnieniu (---) i pominięciu zjawiska nasycenia (- - -)

Fig.7. Waves of the generator load angle during 3- phase cleared fault (0,2 s) at the stator terminals calculated when taking into account (---) or neglecting (---) saturation effect

6. UWAGI KOŃCOWE

Przeprowadzone badania symulacyjne oraz przedstawione wybrane wyniki badań wykazały potrzebę uwzględnienia w modelu matematycznym maszyny synchronicznej zjawiska nasycenia rdzeni magnetycznych przez pole magnetyczne główne. Uzyskane bowiem wyniki badań oraz dokonane porównania przebiegów czasowych wielkości

elektromagnetycznych i elektromechanicznych maszyny, obliczonych przy uwzględnieniu i pominięciu zjawiska nasycenia w jej modelu matematycznym, wskazały na istnienie rozbieżności między tymi przebiegami. Rozbieżności te są szczególnie duże przy powiększonym (w stosunku do napięcia znamionowego) napięciu stojana. Przykładowo, różnice między wartościami maksymalnymi prądów stojana i wzbudzenia wynoszą około 10-15%, a różnice między kolejnymi amplitudami kołysań kąta obciążenia sięgają 20-50%. Główną przyczyną obserwowanych rozbieżności są różne wartości początkowe wielkości elektromagnetycznych i elektromechanicznych maszyny wyznaczane w stanie ustalonym. Uwzględnienie zjawiska nasycenia dla pola magnetycznego głównego w modelu matematycznym maszyny przyczynia się do poprawy dokładności obliczeń stanów dynamicznych systemów elektroenergetycznych. Przedstawiony model matematyczny maszyny powinien więc być zaimplementowany w programach komputerowych służących do analiz krótko-i średniookresowej stabilności tych systemów.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

U, U_d, U_q - moduł oraz składowe osiowe napięcia stojana,
I_d, I_q, - składowe osiowe prądu stojana,
$u_f^\bullet, i_f^\bullet$ - napięcie i prąd wzbudzenia,
$\Psi_d, \Psi_q, \Psi_f, \Psi_{D1}, \Psi_{D2}$,
$\Psi_{Q1}, \Psi_{Q2}, \Psi_{Q3}$ - sprzężenia magnetyczne obwodów elektrycznych stojana i wirnika,
$i^\bullet_{D1}, i^\bullet_{D2}, i^\bullet_{Q1}, i^\bullet_{Q2}, i^\bullet_{Q3}$ - prądy zastępczych obwodów tłumiących w wirniku,
$R, R_f^\bullet, R^\bullet_{D1}, R^\bullet_{D2}$,
$R^\bullet_{Q1}, R^\bullet_{Q2}, R^\bullet_{Q3}$ - rezystancja stojana, wzbudzenia, zastępczych obwodów tłumiących,
$L_\sigma, L_f^\bullet, L^\bullet_{\sigma D1}, L^\bullet_{\sigma D2}$, - indukcyjność rozproszenia stojana, wzbudzenia, obwodów
$L^\bullet_{\sigma Q1}, L^\bullet_{\sigma Q2}, L^\bullet_{\sigma Q3}, L_{\sigma D1}$ tłumiących oraz indukcyjność rozproszenia różnicowego,
$I_m, \gamma_m, I_{md}, I_{mq}$ - moduł, argument, składowe osiowe fazora przestrzennego prądu magnesującego,
Ψ_{md}, Ψ_{mq} - sprzężenia magnetyczne oraz syntetyczne charakterystyki sprzężeń
$\Psi_{md1}, \Psi_{mq1}, \Psi_{md3}, \Psi_{mq3}$ magnetycznych pola magnetycznego głównego,
$L_{md}, L_{mq}, L_{Dmd}, L_{Dmq}, L_{Dmdq}, L_{Dmqd}$ - statyczne i dynamiczne indukcyjności magnesujące,
ω, J, p - elektryczna prędkość kątowa wirnika, moment bezwładności, liczba par biegunów,
M_m - moment mechaniczny,
P, ϑ_l - moc czynna oraz kąt obciążenia maszyny,
r - wskaźnik oznaczający wartości w jednostkach względnych,
• - oznacza sprowadzenie parametrów i wielkości fizycznych wirnika na stronę stojana.

LITERATURA

1. IEEE Guide for synchronous generator modeling practices in stability analyses, IEEE Std 1110-1991.
2. Ramshaw R.S., Xie G.: Nonlinear model of nonsalient synchronous machines. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol.103, No.7, July 1984, pp. 1809-1815.
3. Kudła J.: Obliczenia nieliniowych charakterystyk sprzężeń magnetycznych pola magnetycznego głównego w maszynie synchronicznej cylindrycznej. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. Elektryka z.149, 1996, str. 99-110.
4. Shackshaft G., Henser P.B.: Model of generator saturation for use in power system studies. Proc.IEE, Vol.126, No. 8, August 1979, pp.759-763.
5. Tamura J.,Takeda I.: A New model of saturated machines for power system transient stability simulations. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.10, No.2, June 1995 pp. 218-224.

Recenzent: Dr hab. inż. Mieczysław Ronkowski

Wpłynęło do Redakcji dnia 30 maja 1997 r.

Abstract

The system of differential-algebraic equations (1,2,3) which describe the dynamic state of a synchronous machine has been presented. Saturation of the machine magnetic cores by the main magnetic field has been taken into consideration in these equations by means of the nonlinear synthetic characteristics of magnetic flux linkages (9). Having defined the static and dynamic magnetizing inductances (11) and having expressed them by the synthetic characteristics of magnetic flux linkages (12,14) the system of differential equations (15) (voltage-current equations) has been formulated. The elaborated mathematical model of a synchronous machine differs from the machine mathematical model in which saturation is neglected. These differences have been shown on the synchronous machine equivalent circuit (Fig.4). Basing on this mathematical model computation of typical transient states for tubogenerator of 210 MW have been made. Comparison of the waves of the machine electromagnetic and electromechanical quantities (Fig.5,6,7) calculated when taking into account saturation in the machine mathematical model with those calculated when neglecting saturation in it has brought out discrepancies between these waves. Therefore the presented mathematical model should be implemented into computer programms applied to analysis of transient stability of electric power system.