

Н.В.РУДЕВИЧ, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»;
М.Ф. ПІСКУРЬОВ, доц., НТУ «ХПІ».

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В ФАЗНИХ КООРДИНАТАХ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

В статті розглянуто реалізація математичної моделі синхронного генератора в середовищі Matlab.

Ключові слова: математична модель, синхронний генератор

Постановка проблеми. Сучасні комп'ютерні технології, в основі яких лежать прикладні пакети, дають можливість більш глибокого вивчення питань, пов'язаних з процесами в електричних системах. Інструментом дослідження перехідних процесів в електричних системах може слугувати програма Matlab. Для дослідження процесів в електричній системі за допомогою цієї програми необхідно в середовищі Matlab створити комп'ютерну модель елементів електричної системи на базі їх математичних моделей. При моделюванні процесів в синхронному генераторі використовують або математичну модель в фазних координатах або в dq координатах. В статті розглянуто математичну модель синхронного генератора в фазних координатах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В роботах [1, 2] наведений класичний вигляд математичної моделі синхронного генератора. Рівняння балансу напруг записується як

$$\left. \begin{aligned} u_s &= -\frac{d\psi_s}{dt} - r_s i_s, s = \{A, B, C\} \\ u_f &= \frac{d\psi_f}{dt} + r_f i_f \\ 0 &= \frac{d\psi_{1k}}{dt} + r_{1k} i_{1k}, k = \{d, q\} \end{aligned} \right\}, \quad (1.1)$$

де r_A, r_B, r_C – активний опір обмоток статора r_{st} фази А, В, С відповідно; r_f – активний опір обмотки збудження; r_{1d}, r_{1q} – активний опір обмоток ротора по продольній та поперечній осям відповідно; $\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_{1d}, \psi_{1q}, \psi_f$ – потокозчеплення статорних обмоток, роторних обмоток по відповідним осям та обмотки збудження;

© Н.В.Рудевич, М.Ф.Піскурьов, 2013

$i_A, i_B, i_C, i_{1d}, i_{1q}, i_f$ – струми в статорних обмотках фаз А, В, С відповідно, роторних обмотках по відповідним осям та в обмотці збудження; u_A, u_B, u_C, u_f – напруга в статорних обмотках фаз А, В, С відповідно та напруга, що підведена до обмотки збудження.

Потокозчеплення кожної обмотки записується як добуток струмів на відповідні індуктивності та взаємні індуктивності

$$\left. \begin{aligned} \psi_A &= L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M_{Af} i_f + M_{A1d} i_{1d} + M_{A1q} i_{1q} \\ \psi_B &= M_{BA} i_A + L_B i_B + M_{BC} i_C + M_{Bf} i_f + M_{B1d} i_{1d} + M_{B1q} i_{1q} \\ \psi_C &= M_{CA} i_A + M_{CB} i_B + L_C i_C + M_{Cf} i_f + M_{C1d} i_{1d} + M_{C1q} i_{1q} \\ \psi_f &= M_{fA} i_A + M_{fB} i_B + M_{fC} i_C + L_f i_f + M_{f1d} i_{1d} \\ \psi_{1d} &= M_{1dA} i_A + M_{1dB} i_B + M_{1dC} i_C + M_{1df} i_f + L_{1d} i_{1d} \\ \psi_{1q} &= M_{1qA} i_A + M_{1qB} i_B + M_{1qC} i_C + L_{1q} i_{1q} \end{aligned} \right\}. \quad (1.2)$$

В машині, що обертається тільки індуктивності L_f, L_{1d}, L_{1q} можна вважати незмінними. Всі інші L та M залежать від положення ротора відносно обмоток статора, а, отже, є функціями часу

$$\left. \begin{aligned} L_s &= l_0 + l_2 \cos 2(\gamma + \alpha), s = \{A, B, C\}, \alpha = \left\{0, -\frac{2\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}\right\} \\ M_{ss} &= m_0 + m_2 \cos 2(\gamma + \alpha), s = \{BC, AB, AC\}, \alpha = \left\{0, -\frac{2\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}\right\} \\ M_{sf} &= M_d \cos(\gamma + \alpha), s = \{A, B, C\}, \alpha = \left\{0, -\frac{2\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}\right\} \\ M_{1ds} &\cong M_d \cos(\gamma + \alpha), s = \{A, B, C\}, \alpha = \left\{0, -\frac{2\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}\right\} \\ M_{1qs} &= M_q \cos(\gamma + \alpha), s = \{A, B, C\}, \alpha = \left\{0, -\frac{2\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}\right\} \end{aligned} \right\}, \quad (1.3)$$

де l_0, m_0 – постійні складові відповідних індуктивностей; l_2, m_2 – амплітуди других гармонік тих же індуктивностей; γ – кут між магнітною оссю фази А та продольною оссю d , $\gamma = \omega_0 t + \gamma_0$ (ω_0 – синхронна кутова швидкість обертання поля статора), l_0 та m_0, l_2 та m_2 виражаються через індуктивності, якими звичайно характеризується синхронна машина

$$l_0 = \frac{1}{3}(L_d + L_q + L_0), l_2 = m_2 = \frac{1}{3}(L_d - L_q), m_0 = \frac{1}{3}\left(L_0 - \frac{L_d + L_q}{2}\right), \quad (1.4)$$

де в відносних одиницях $L_d = X_d; L_q = X_q; L_0 = X_0$.

Системи рівнянь 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 представляють математичну модель явнопольного синхронного генератора з урахуванням демпферних обмоток в режимі холостого ходу, коли фазні струми дорівнюють нулю $i_A = 0, i_B = 0, i_C = 0$. В навантаженому режимі ця модель повинна бути доповнена системою рівнянь, які відображають залежність струму статорних обмоток фаз A, B, C від відповідних напруг. Наприклад, при статичному симетричному навантаженні, що носить активно-індуктивний характер, залежність між струмом навантаження та напругою генератора має вигляд

$$u_S = r_{нав} i_S + \frac{di_S}{dt} L_{нав}, \quad (1.5)$$

де $r_{нав}$ – активний опір навантаження фази; $L_{нав}$ – індуктивність навантаження фази, $L_{нав} = L_{вл} - M_{вз}$ ($L_{вл}$ – власна індуктивність фази, $M_{вз}$ – взаємні індуктивності між фазами).

При відсутності демпферних обмоток у генератора останнє рівняння в системі (1.1) та два останні рівняння в системі (1.2) і (1.3) будуть відсутні. У випадку неявнопольного генератора, при умові його електричної симетрії, модель буде спрощена за рахунок того, що $L_d = L_q$, а, отже,

$$L_A = L_B = L_C = l_0 \quad \text{та} \quad M_{AB} = M_{AC} = M_{CB} = M_{BA} = M_{CA} = M_{BC} = m_0. \quad (1.7)$$

Мета статті. Побудова математичної моделі явнопольного синхронного генератора без демпферних обмоток для дослідження електромагнітних перехідних процесів при раптовому замиканні фаз в будь-якій точці кола навантаження або на шинах генератора для створення відповідної комп'ютерної моделі в середовищі Matlab.

Основні матеріали досліджень. Для створення комп'ютерної моделі явнопольного синхронного генератора без демпферних обмоток для дослідження електромагнітних перехідних процесів при раптовому замиканні фаз в будь-якій точці кола навантаження або на шинах генератора зручно використовувати наступний вигляд математичної моделі синхронного генератора.

Струм в обмотці збудження визначається згідно з рівнянням

$$\frac{1}{\omega_o} \frac{di_f}{dt} L_f + r_f i_f = u_f - \frac{1}{\omega_o} \frac{d(M_{fA} i_A + M_{fB} i_B + M_{fC} i_C)}{dt}. \quad (1.8)$$

Електрорушійна сила кожної фази визначається згідно з системою рівнянь

$$\left. \begin{aligned} e_A &= -\frac{d(M_{Af} i_f)}{dt} \\ e_B &= -\frac{d(M_{Bf} i_f)}{dt} \\ e_C &= -\frac{d(M_{Cf} i_f)}{dt} \end{aligned} \right\}. \quad (1.9)$$

Похідна потокозчеплення кожної обмотки фаз має вигляд

$$\left. \begin{aligned} -\frac{d\psi_A}{dt} &= e_A - \frac{d(L_A i_A)}{dt} - \frac{d(M_{AB} i_B)}{dt} + \frac{d(M_{AC} i_C)}{dt} \\ -\frac{d\psi_B}{dt} &= e_B - \frac{d(L_B i_B)}{dt} - \frac{d(M_{BA} i_A)}{dt} + \frac{d(M_{BC} i_C)}{dt} \\ -\frac{d\psi_C}{dt} &= e_C - \frac{d(L_C i_C)}{dt} - \frac{d(M_{CA} i_A)}{dt} + \frac{d(M_{CB} i_B)}{dt} \end{aligned} \right\}. \quad (1.10)$$

Баланс напруг на шинах генератора кожної фази визначається згідно з системою рівнянь

$$\left. \begin{aligned} u_A &= -\frac{d\psi_A}{\omega_o dt} - r i_A \\ u_B &= -\frac{d\psi_B}{\omega_o dt} - r i_B \\ u_C &= -\frac{d\psi_C}{\omega_o dt} - r i_C \end{aligned} \right\}. \quad (1.11)$$

Струм статора кожної фази генератора реалізується у вигляді системи

$$\left. \begin{aligned} i_A &= \int \frac{e_A - \left(\frac{dL_A}{\omega_o dt} + r_{нав} + r_{st}\right) i_A - \frac{1}{\omega_o} \frac{d(M_{AB} i_B)}{dt} - \frac{1}{\omega_o} \frac{d(M_{AC} i_C)}{dt}}{(L_A + L_{нав}) / \omega_o} \\ i_B &= \int \frac{e_B - \left(\frac{dL_B}{\omega_o dt} + r_{нав} + r_{st}\right) i_B - \frac{1}{\omega_o} \frac{d(M_{BA} i_A)}{dt} - \frac{1}{\omega_o} \frac{d(M_{BC} i_C)}{dt}}{(L_B + L_{нав}) / \omega_o} \\ i_C &= \int \frac{e_C - \left(\frac{dL_C}{\omega_o dt} + r_{нав} + r_{st}\right) i_C - \frac{1}{\omega_o} \frac{d(M_{CA} i_A)}{dt} - \frac{1}{\omega_o} \frac{d(M_{CB} i_B)}{dt}}{(L_C + L_{нав}) / \omega_o} \end{aligned} \right\}. \quad (1.12)$$

Всі значення параметрів моделі визначаються в відносних одиницях при номінальних умовах, окрім часу t , який виражається в секундах, для відображення процесу в реальному часі. Отримання часу в секундах

досягається шляхом домноження часу, який виражається в формулах в радіанах, на кутову швидкість ω_0 , що має одиниці виміру радіан на секунду ($\omega_0=314$ рад/сек).

Важливою задачею є приведення паспортних параметрів синхронного генератора до параметрів моделі, що виражаються в відносних одиницях при номінальних умовах, наведених до обмотки статора.

Висновки. За допомогою наведеної математичної моделі можна створити комп'ютерну модель синхронного генератора без демпферних обмоток для дослідження електромагнітних перехідних процесів при раптовогому замиканні фаз в будь-якій точці кола навантаження або на шинах генератора.

Список літератури. 1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С.А. Ульянов. – М. : Энергия, 1970. – 520с. 2. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах / Ю.А. Куликов. – М.: Мир. - 2003. - 183с.

Поступила в редколлегию 30.09.2012.

УДК 621.314

Математична модель синхронного генератора в фазних координатах для дослідження електромагнітних перехідних процесів в середовищі Matlab / Рудевич Н.В., Піскурьов М.Ф. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХП». – 2013. - №.17 (990). – С. 114-118. Бібліогр.: 2 назви.

В статье рассмотрено реализацию математической модели синхронного генератора в среде Matlab.

Ключевые слова: математическая модель, синхронный генератор.

In the article it is considered realization of mathematical model of synchronous generator in an environment Matlab.

Keywords: mathematical model, synchronous generator