

УДК 621. 313.3

Н.В. РУДЕВИЧ (канд. техн. наук, доц.), **М.Ф. ПІСКУРЬОВ**
Державний вищий навчальний заклад
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
rudevitch.nat@yandex.ru

РОЗРАХУНОК ВИХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В ФАЗНИХ КООРДИНАТАХ

В статті розглянуто розрахунок вихідних параметрів математичної моделі синхронного генератора з демпферними обмотками в фазних координатах.

Ключові слова: математична модель, синхронний генератор, фазні координати.

Постановка проблеми. Для дослідження процесів в електричних системах першочерговою задачею є створення математичних моделей елементів системи. Широке розповсюдження отримало математичне моделювання трифазних елементів з рухомими відносно один одного магнітозв'язаними ланцюгами в $dq0$ координатах, а при аналізі несиметричних режимів – використання метода симетричних складових. Головною перевагою моделювання в $dq0$ координатах є відсутність періодично змінних коефіцієнтів в системі диференціальних рівнянь та зменшення її порядку. Сучасні комп'ютерні технології дозволяють реалізувати складні алгоритми рішення систем диференціальних рівнянь. У зв'язку з цим останнім часом набуває широке розповсюдження моделювання в фазних координатах [1, 2]. Дослідження електромагнітних та електромеханічних процесів в фазних координатах має значні переваги, а саме з розрахунку можна одразу бачити реальні значення параметрів режиму в трьох фазах, тим самим відмовитися від метода симетричних складових та підвищити точність розрахунку.

Чисельне моделювання процесів в синхронному генераторі в фазних координатах потребує наступних вихідних параметрів: власна індуктивність, взаємоіндуктивність та активний опір фаз обмоток статора генератора ($L_A, L_B, L_C, M_{AB}, M_{AC}, M_{BC}, r_{st}$); власна індуктивність, взаємоіндуктивність, активний опір та напруга обмотки збудження ($L_f, M_{fA}, M_{fB}, M_{fC}, r_f, U_f$); власна індуктивність, взаємоіндуктивність та активний опір демпферних обмоток ($L_{1d}, L_{1q}, M_{1dA}, M_{1dB}, M_{1dC}, M_{1qA}, M_{1qB}, M_{1qC}, r_{1d}, r_{1q}$); постійна часу генератора (T_J). Більшість параметрів моделі генератора не наведені в довідникових даних: $L_A, L_B, L_C, M_{AB}, M_{AC}, M_{BC}, L_f, M_{fA}, M_{fB}, M_{fC}, M_{1dA}, M_{1dB}, M_{1dC}, M_{1qA}, M_{1qB}, M_{1qC}, r_f, r_{1d}, r_{1q}, T_J$. Отже, актуальною задачею є перерахунок довідникових параметрів до параметрів моделі, наведених до обмотки статора.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Математична модель синхронного генератора в фазних координатах розглянута в літературі [2, 3, 4]. Питанню визначення параметрів математичної моделі синхронних машин приділяється увага в роботах [2, 5-7], але авторам невідомі роботи, де б цілісно було висвітлено вирази для визначення вихідних параметрів моделі синхронного генератора в фазних координатах.

Мета статті. Визначити вирази для розрахунку вихідних параметрів математичної моделі синхронного генератора в фазних координатах по довідниковим даним.

Основні матеріали досліджень. Розрахунок параметрів моделі синхронного генератора залежить від того, в яких одиницях виміру буде здійснюватись моделювання – в відносних чи іменованих.

При моделюванні в відносних одиницях при номінальних умовах генератора розрахунок параметрів моделі, наведених до обмотки статора, здійснюється наступним чином.

Власна індуктивність та взаємоіндуктивність фаз обмоток статора без врахування гармонік вище другого порядку дорівнює [3]

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

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 A та продольною оссю d , $\gamma = \omega_0 t + \gamma_0$ (ω_0 – синхронна кутова швидкість обертання поля статора, рад/сек), l_0 та m_0, l_2 та m_2 визначаються як [1]

$$l_{0*H} = \frac{1}{3} (L_{d*H} + L_{q*H} + L_{0*H}), \quad l_{2*H} = m_{2*H} = \frac{1}{3} (L_{d*H} - L_{q*H}), \quad m_{0*H} = \frac{1}{3} \left(L_{0*H} - \frac{L_{d*H} + L_{q*H}}{2} \right), \quad (2)$$

де $L_{d*H}, L_{q*H}, L_{0*H}$ – індуктивності генератора в $dq0$ координатах, що визначаються наступним чином [3]

$$L_{d*H} = X_{d*H}, \quad L_{q*H} = X_{q*H}, \quad L_{0*H} = X_{0*H}, \quad (3)$$

де X_{d^*H} , X'_{d^*H} , X''_{d^*H} – індуктивний синхронний, перехідний та сверхперехідний опір генератора по продольній осі; X_{q^*H} , X'_{q^*H} – індуктивний синхронний та сверхперехідний опір генератора по поперечній осі; X_{0^*H} – індуктивний опір генератора нульової послідовності (довідникові дані [8]).

Власна індуктивність обмотки збудження та демпферних обмоток розраховується як [7]

$$L_{f^*H} = X_{f^*H}, L_{1d^*H} = X_{1d^*H}, L_{1q^*H} = X_{1q^*H}, \quad (4)$$

$$\text{де } X_{f^*H} = K_{\text{нав}} \frac{X_{ad^*H}^2}{X_{d^*H} - X'_{d^*H}}, X_{1d^*H} = X_{ad^*H} + X_{\sigma 1d^*H}, X_{1q^*H} = X_{aq^*H} + X_{\sigma 1q^*H}, \quad (5)$$

$$\text{де } K_{\text{нав}} - \text{коефіцієнт наведення параметрів ротора до обмотки статора, } K_{\text{нав}} = \frac{Z_{\text{ном}} X_{ad^*H}^2 I_{f\text{xx}}^2}{\text{ВКЗ} \cdot X_{d^*H} S_{\text{ном}}},$$

$$\text{де } Z_{\text{ном}} - \text{номінальний повний опір генератора, } Z_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}} \quad (U_{\text{ном}} - \text{номінальна напруга генератора, кВ;}$$

$S_{\text{ном}}$ – номінальна потужність генератора, МВА), $I_{f\text{xx}}$ – струм збудження при роботі генератора на холостому ході, кА, ВКЗ – відношення короткого замикання (довідникові дані [8]); $X_{\sigma 1d^*H}$, $X_{\sigma 1q^*H}$ – індуктивний опір розсіювання демпферних обмоток по осі d та q відповідно, що розраховуються за формулами [6]

$$X_{\sigma 1d^*H} = \frac{K_{\text{нав}}}{\frac{1}{X''_{d^*H} - X_{\sigma d^*H}} - \frac{1}{X_{ad^*H}} - \frac{1}{X_{\sigma f^*H}}}, X_{\sigma 1q^*H} = \frac{K_{\text{нав}}}{\frac{1}{X''_{q^*H} - X_{\sigma q^*H}} - \frac{1}{X_{aq^*H}}}, \quad (6)$$

де $X_{\sigma d^*H}$, $X_{\sigma q^*H}$ – індуктивний опір розсіювання обмотки статора по відповідним осям, що визначається як [6]

$$X_{\sigma d^*H} = X_{d^*H} - X_{ad^*H}, X_{\sigma q^*H} = X_{q^*H} - X_{aq^*H}. \quad (7)$$

Взаємоіндуктивність обмотки збудження та демпферних обмоток по осі d та q розраховується як [3]

$$\left. \begin{aligned} M_{sf^*H} &= M_{f^*H} = M_{d^*H} \cos(\gamma + \alpha), s = \{A, B, C, 1d\} \\ M_{s1d^*H} &= M_{1ds^*H} \cong M_{d^*H} \cos(\gamma + \alpha), s = \{A, B, C\} \\ M_{s1q^*H} &= M_{1qs^*H} = M_{q^*H} \sin(\gamma + \alpha), s = \{A, B, C\} \end{aligned} \right\}, \alpha = \left\{ 0, -\frac{2\pi}{3}, \frac{2\pi}{3} \right\}, \quad (8)$$

де M_{d^*H} , M_{q^*H} – взаємна індуктивність будь-якої пари обмоток по відповідним осям, що виражається через взаємний індуктивний опір по осям d та q [6]

$$M_{d^*H} = X_{ad^*H}, M_{q^*H} = X_{aq^*H}, \quad (9)$$

$$\text{де } X_{ad^*H} = \frac{(X_{d^*H} - X'_{d^*H})(X_{d^*H} - X''_{d^*H})}{2(X_{d^*H} - X'_{d^*H}) - (X_{d^*H} - X''_{d^*H})}, X_{aq^*H} = \frac{(X_{q^*H} - X'_{q^*H})^2}{(X_{q^*H} - X'_{q^*H})}. \quad (10)$$

Активний опір статора може бути розрахований при робочій температурі ($T_p=75^\circ\text{C}$) за однією з двох формул [7]

$$r_{st^*H} = \frac{r_{st}}{Z_{\text{ном}}} \quad \text{або} \quad r_{st^*H} = \frac{X_{2^*H}}{\omega_0 T_a^{(3)}}, \quad (11)$$

де X_{2^*H} – індуктивний опір зворотної послідовності генератора, $T_a^{(3)}$ – постійна часу обмотки статора при трифазному КЗ на його шинах, сек. (довідникові дані [8]).

Активні опори демпферних обмоток по осі d та q визначаються як [6]

$$r_{1d^*H} = K_{\text{нав}} \frac{(X_{1d^*H} X_{d^*H} - X_{ad^*H}^2) X''_{d^*H}}{\omega_0 X_{d^*H} X'_{d^*H} T''_{d^*H}}, r_{1q^*H} = K_{\text{нав}} \frac{X_{1q^*H} X_{q^*H} - X_{aq^*H}^2}{\omega_0 X_{q^*H} T''_{q^*H}}, \quad (12)$$

де T''_{d^*H} , T''_{q^*H} – сверхперехідні постійні часу по продольній та поперечній осі при замкнутій накоротко обмотці статора, сек. (довідникові дані [8]).

Активний опір при робочій температурі обмотки збудження розраховують за однією з наведених формул [7]

$$r_{f^*H} = K_{\text{нав}} \frac{X_{f^*H}}{\omega_0 T_{do}} \quad \text{або} \quad r_{f^*H} = r_f \frac{K_{\text{нав}}}{Z_{\text{ном}}} \quad \text{або} \quad r_f = \frac{U_{f\text{ном}}}{I_{f\text{ном}}} \frac{K_{\text{нав}}}{Z_{\text{ном}}}, \quad (13)$$

де T_{do} – постійна часу обмотки збудження при розімкненій обмотці статора, сек.; $U_{fном}$ – номінальна напруга обмотки збудження, В; $I_{fном}$ – номінальний струм обмотки збудження, А (довідникові дані [8]).

У випадку, якщо активний опір будь-якої обмотки у довіднику наведений при температурі, відмінній від робочої, необхідно його перерахувати за формулою [7]

$$R_{T_p} = R_{T_0} \frac{235 + T_p}{235 + T_0}, \quad (14)$$

де T_0 – температура, при якій наведено опір обмотки, T_p – робоча температура.

$$\text{Напруга обмотки ротора, визначається як [3]} \quad U_{f*н} = U_{fном} \frac{I_{fхх} X_{ad*н}}{S_{ном}}.$$

$$\text{Постійна часу генератора [4]} \quad T_{j*н} = \frac{J \omega_0^2 * 10^{-3}}{S_{ном}}, \quad \text{де } J - \text{момент інерції, т*м}^2 \text{ (довідникові дані [8]).}$$

Важливою обставиною є те, що при моделюванні в відносних одиницях при номінальних умовах для отримання процесу в реальному часі, час повинен бути виражений в секундах, отже $t_{*н} = \omega_0 * t$.

При моделюванні в іменованих одиницях розрахунок параметрів моделі здійснюється наступним чином.

Вирази для визначення індуктивностей та взаємні індуктивностей обмоток (3, 4, 9) заміняться відповідно на вирази

$$L_d = \frac{X_d}{\omega_0}, \quad L_q = \frac{X_q}{\omega_0}, \quad L_0 = \frac{X_0}{\omega_0}, \quad L_f = \frac{X_f}{\omega_0}, \quad L_{1d} = \frac{X_{1d}}{\omega_0}, \quad L_{1q} = \frac{X_{1q}}{\omega_0}, \quad M_d = \frac{X_{ad}}{\omega_0}, \quad M_q = \frac{X_{aq}}{\omega_0}.$$

Напруга обмотки ротора, що наведена до обмотки статора, визначається як [3] $U_f = U_{fном} X_{ad*н}$.

$$\text{Постійна часу генератора в секундах розраховується за формулою} \quad T_j = \frac{J \omega_0 * 10^{-3}}{S_{ном}}.$$

Перерахунок індуктивного опору будь-якої обмотки з відносних одиниць до іменованих має вигляд $X = X_{*н} Z_{ном}$. Обчислення всіх інших параметрів здійснюється згідно з формул (1, 2, 5, 6, 7, 8, 10-14), за умови, що всі величини в них будуть виражені в іменованих одиницях, а коефіцієнт наведення розраховується за формулою

$$K_{нав} = \frac{X_{ad*н}^2}{BKЗ * X_{d*н}}.$$

Висновки. Таким чином, за допомогою наведених формул можна розрахувати вихідні параметри математичної моделі синхронного генератора в фазних координатах, а в подальшому отримати вирази для розрахунку вихідних даних математичних моделей в фазних координатах всіх елементів електричної системи з рухомими магнітозв'язаними ланцюгами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Математичне моделювання в електроенергетиці: підручник / [О.В. Кириленко, М.С. Сегеда, О.Ф. Буткевич, Т.А. Мазур]. – Львів: Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2010. – 608с.
2. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: учеб. пособ. / Ю.А. Куликов; Новосибирск: НГТУ. - М.: Мир: ООО «Издательство АСТ», 2003. – 283с.
3. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С.А. Ульянов. - М.: Энергия, 1970. – 520с.
4. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В.А. Веников. М.: Высш. шк., 1985. – 536с.
5. Сивокобыленко В.Ф. Математическое моделирование в электротехнике и энергетике: учеб. пособ. / В.Ф. Сивокобыленко. - Донецк : РВА ДонНТУ., 2005.– 350с.
6. Меркурьев Г.В. Устойчивость энергосистем [Электронный ресурс] / Г.В. Меркурьев, Ю.М. Шаргин. – СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. – 300с.. – Режим доступа : <http://www.cpk-energo.ru>.
7. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / Под ред. Б.Н. Неклепаева. - М.:Изд-во НИЦ «ЭНАС», 2006. – 144с.
8. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: учеб. пособ. [для вузов] / Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков. М.: Энергоатомиздат., 1989. – 608с.
9. ООО «Реммотор» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.motor-reмонт.ru>.

REFERENCES

1. Kirilenko O.V., Segeda M.S., Butkevich O.F., Mazur T.A. *Matemaychne modeluvannya v electroenergetyzi* [Mathematical modeling is in the energy]. Lviv: Vydavnytvo Nazionalnogo universytetu "Lvivska politehnika", 2010. 608 p.
2. Kulikov U.A. *Perehodnye prozeczy v elektricheskikh systemah* [Transients are in the electric systems]. Novosibirsk: NGTU, Moscow: Mir: OOO "Izdatelstvo AST", 2003. 283p.
3. Ulyanov V.A. *Electromagnitnye perehodnye prozeczy v elektricheskikh systemax* [Electromagnetic transients are in the electric systems]. Moscow: Energiya, 1970. 520 p.
4. Venikov V.A. *Perehodnye electromehaniicheskie prozeczy v elektricheskikh systemah* [Electromechanical transients are in the electric systems]. Moscow: Vysshay shkola, 1985. 536 p.
5. Sivokobulenko V.F. *Matematicheskoe modelirovanie v elektrotehnike i energetike* [Mathematical modeling is in the electrical engineering and energy]. Donetsk: RVA DonNTU, 2005. 350p.
6. Merkur'yev G.V., Shargin U.M. *Ustoychivost energosystem* [Stability of grids]. Saint Petersburg: NOU "Zentr podgotovki kadrov energetiki", 2006. 300p.
7. Neklepaev B.N. *Rukovodyashie ukazania po raschetu tokov korotkogo zamykania* [Leading pointing upon calculation of currents of short circuit and choice of electrical equipment]. Moscow: NZ "ENAS", 2006. 144p.
8. Neklepaev B.N. *Elektricheskay chast elektrostanziy i podstanziy* [Electric part of power stations and substations]. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 608 p.
9. OOO «Remmotor» [Elektronnyi resurs]. – Regim dostupa : <http://www.motor-remont.ru>.

Надійшла до редакції 28.02.2013

Рецензент: В.Ф. Сивокобиленко

Н.В.РУДЕВИЧ, М.Ф.ПИСКУРЕВ

Государственное высшее учебное заведение

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

Расчет исходных данных параметров математической модели синхронного генератора в фазных координатах. В статье рассмотрен расчет исходных параметров математической модели синхронного генератора с демпферными обмотками в фазных координатах.

Ключевые слова: математическая модель, синхронный генератор, фазные координаты.

N. RUDEVICH, M. PISKUREV

State Institution of Higher Education National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"

Calculation of Initial Parameters of Mathematical Model of Synchronous Generator in Phase Coordinates. The article is devoted to calculation of initial parameters of mathematical model of the salient pole synchronous generator with damping windings in phase coordinates. Initial parameters of mathematical model of the synchronous generator are revealed. The parameters of mathematical model, which are absent in help data, are called. Expressions for determination of own inductance and mutual inductance of phases of windings of a stator of mathematical model according to help data of the synchronous generator are given. Formulas for calculation of own inductance and mutual inductance of a winding of excitation of the mathematical model given to a stator winding are defined. Settlement expressions of own inductance and mutual inductance of damping windings on a cross and longitudinal axis of the mathematical model given to a stator winding are given. Expressions for calculation of active resistance of a winding of excitation of mathematical model are considered at a working temperature and the stator given to a winding. Formulas for determination of active resistance of a winding of a stator of mathematical model are written down at a working temperature. Settlement formulas of active resistance of damping windings are determined by a longitudinal and cross axis of mathematical model at a working temperature. Expression for calculation of constant inertia of the synchronous generator, and also voltage of a winding of excitation of mathematical model is written down. The formula of recalculation of active resistance to working temperature is given. The expressions considered in article for determination of initial parameters of mathematical model of the salient pole synchronous generator with damping windings are given in phase coordinates for cases when modeling is carried out in called units or in relative units under nominal conditions of the generator.

Keywords: mathematical model, synchronous generator, phase coordinate.