

Математическое моделирование процессов в генераторе на базе асинхронной машины с фазным ротором

Сейтказы Кешуов, Оркен Ордатаев

Mathematical modelling of the generator based on the asynchronous machine with wound rotor: We derive equations of transients in the generator based on the asynchronous motor with wound rotor. Simulation of operating modes the possibility of frequency stabilization of generator voltage regulation frequency and phase sequence for three-phase current excitation.

Key words: generator, asynchronous motor with wound rotor, transient processes, mathematical model, stabilization of voltage frequency.

ВВЕДЕНИЕ

Нами предлагается, подавая на трехфазную обмотку ротора генератора, посредством современных микропроцессорных устройств, регулируемый по величине, частоте и чередованию фаз трехфазный ток, добиться регулирования ЭДС обмоток статора генератора, как по частоте вращения основного магнитного потока, так и по его величине, тем самым стабилизировать выходное напряжение генератора при переменной величине оборотов первичного двигателя и нагрузки генератора.

В ходе работы системы в различных режимах работы возникают переходные процессы, оказывающие непосредственное влияние на качество напряжения в системе. Только в случае предварительного расчета процессов в системе на базе математических моделей, можно с наименьшими затратами осуществить правильный выбор оборудования. При составлении модели необходимо учесть особенности конструкции электрической машины, падение напряжения в кабельной линии и электромагнитную инерцию индуктивностей в электрической цепи [1].

ИЗЛОЖЕНИЕ

Особенностью моделирования генератора на базе асинхронного двигателя с фазным ротором является то, что на обмотки ротора через контактные кольца подается трехфазный ток регулируемой величины, частоты и чередованием фаз.

С учетом известных допущений, уравнения напряжений фазных обмоток ротора для мгновенных значений запишутся как

$$u_a = R_r i_a + \frac{d\psi_a}{dt}; \quad u_b = R_r i_b + \frac{d\psi_b}{dt}; \quad u_c = R_r i_c + \frac{d\psi_c}{dt}, \quad (1)$$

где u_a , u_b , u_c - фазные напряжения обмоток ротора; ψ_a , ψ_b , ψ_c , i_a , i_b , i_c - потокосцепления и токи обмотки ротора; R_r - активное сопротивление обмотки ротора, t - время.

Уравнения напряжений для обмоток статора

$$0 = R_s i_A + \frac{d\psi_A}{dt}; \quad 0 = R_s i_B + \frac{d\psi_B}{dt}; \quad 0 = R_s i_C + \frac{d\psi_C}{dt}. \quad (2)$$

где ψ_A , ψ_B , ψ_C , i_A , i_B , i_C - потокосцепления и токи обмоток ротора, R_s - активное сопротивление фазы обмотки ротора.

Уравнения потокосцеплений обмоток

$$\left. \begin{aligned} \psi_A &= L_s i_A + M_s i_B + M_s i_C + M_{sr} \cos \varphi i_a + M_{sr} \cos(\varphi + 120^\circ) i_b + M_{sr} \cos(\varphi - 120^\circ) i_c; \\ \psi_B &= M_s i_A + L_s i_B + M_s i_C + M_{sr} \cos(\varphi - 120^\circ) i_a + M_{sr} \cos \varphi i_b + M_{sr} \cos(\varphi + 120^\circ) i_c; \\ \psi_C &= M_s i_A + M_s i_B + L_s i_C + M_{sr} \cos(\varphi + 120^\circ) i_a + M_{sr} \cos(\varphi - 120^\circ) i_b + M_{sr} \cos \varphi i_c, \end{aligned} \right\} (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_a &= M_{sr} \cos \varphi i_A + M_{sr} \cos(\varphi - 120^\circ) i_B + M_{sr} \cos(\varphi + 120^\circ) i_C + L_r i_a + M_r i_b + M_r i_c; \\ \psi_b &= M_{sr} \cos(\varphi + 120^\circ) i_A + M_{sr} \cos \varphi i_B + M_{sr} \cos(\varphi - 120^\circ) i_C + M_r i_a + L_r i_b + M_r i_c; \\ \psi_c &= M_{sr} \cos(\varphi - 120^\circ) i_A + M_{sr} \cos(\varphi + 120^\circ) i_B + M_{sr} \cos \varphi i_C + M_r i_a + M_r i_b + L_r i_c, \end{aligned} \right\} (4)$$

где L_S, L_R - индуктивности обмоток статора и ротора; M - взаимные индуктивности обмоток, принадлежность которых к какой-либо из обмоток следует из буквенных обозначений; φ - угол между осями обмоток статора и ротора.

Электрический угол φ , угол δ поворота результирующего поля обмоток ротора относительно статора и угол γ поворота результирующего магнитного поля обмоток ротора относительно ротора найдем как

$$\varphi = \int_0^t \omega_r dt + \varphi_0, \quad \delta = \int_0^t \omega_k dt + \delta_0, \quad \gamma = \int_0^t (\omega_k - \omega_r) dt + \gamma_0 \quad (5)(6)(7)$$

где ω_r - скорость вращения ротора в электрических радианах в секунду; ω_k - скорость результирующего магнитного поля обмоток ротора; $\varphi_0, \delta_0, \gamma_0$ - начальные электрические углы.

Напряжение на фазах нагрузки

$$u_{LA} = R_L i_A + \frac{d\psi_{LA}}{dt}; \quad u_{LB} = R_L i_B + \frac{d\psi_{LB}}{dt}; \quad u_{LC} = R_L i_C + \frac{d\psi_{LC}}{dt}, \quad (8)$$

где R_L - активное сопротивление фазы нагрузки; $\psi_{LA} = L_L i_A$, $\psi_{LB} = L_L i_B$, $\psi_{LC} = L_L i_C$ - потокосцепления фаз нагрузки, L_L - индуктивность фазы нагрузки.

Полученные дифференциальные уравнения напряжений синхронного генератора (1) - (4) являются нелинейными и с периодическими коэффициентами, поэтому их решение достаточно затруднительно.

Уравнения можно существенно упростить, прибегнув к линейным преобразованиям, смысл которых заключается в замене исходных переменных новыми, или, изменив систему координат, путем перехода от трех осей (A, B, C) к двум (x, y). Физически это означает переход к двухфазной машине с магнитными осями фазных обмоток сдвинутых на 90° электрических [1].

В нашем случае целесообразно использовать систему осей (u, v), вращающихся вместе с полем ротора с заданной скоростью ω_k совместив ось u с осью результирующего магнитного потока обмоток ротора. Поперечную ось v примем отстающей от оси u на 90° [2]. На рис.1 показаны изображающие векторы

токов ротора $\bar{I}_r$ в системе координат (a, b, c) и статора $\bar{I}_s$ в системе координат (A, B, C), а также система координат (u, v).

Проведя необходимые преобразования исходных уравнений к осям u, v, получим для (1) и (2)

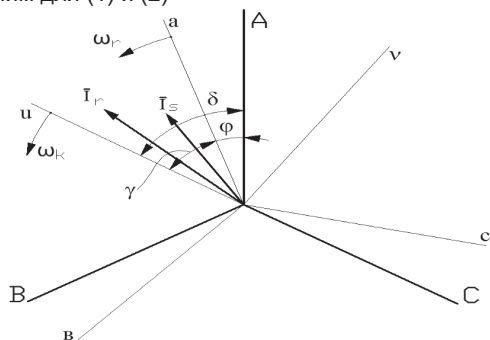


Рисунок 1 – Изображающие векторы в системе координат с тремя симметричными и двумя нормальными друг другу осями.

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{ur}}{dt} &= u_{ur} - (\omega_k - \omega_r) \cdot \psi_{vr} - R_r i_{ur}; \\ \frac{d\psi_{vr}}{dt} &= u_{vr} + (\omega_k - \omega_r) \cdot \psi_{ur} - R_r i_{vr}; \\ \frac{d\psi_{us}}{dt} &= -\omega_k \psi_{vs} - R_s i_{us}; \\ \frac{d\psi_{vs}}{dt} &= \omega_k \psi_{us} - R_s i_{vs}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где u_{ur} , u_{vr} , ψ_{ur} , ψ_{vr} и i_{ur} , i_{vr} - соответственно продольные и поперечные составляющие напряжения, потокосцепления и тока обмотки ротора; ψ_{us} , ψ_{vs} и i_{us} , i_{vs} - соответственно продольные и поперечные составляющие напряжения, потокосцепления и тока обмотки статора.

Произведя аналогичные действия над фазными потокосцеплениями (3) и (4), найдем

$$\begin{aligned} \psi_{ur} &= (L_r - M_r) i_{ur} + \frac{3}{2} M_{rs} i_{us}; \quad \psi_{vr} = (L_r - M_r) i_{vr} + \frac{3}{2} M_{rs} i_{vs}; \\ \psi_{us} &= (L_s - M_s) i_{us} + \frac{3}{2} M_{rs} i_{ur}; \quad \psi_{vs} = (L_s - M_s) i_{vs} + \frac{3}{2} M_{rs} i_{vr}, \end{aligned} \quad (10)$$

В (8) заменим исходные переменные на новые в осях u, v

$$u_{uL} = R_L i_{us} + \frac{d\psi_{uL}}{dt}; \quad u_{vL} = R_L i_{vs} + \frac{d\psi_{vL}}{dt}, \quad (11)$$

где $\psi_{uL} = L_L i_{us}$, $\psi_{vL} = L_L i_{vs}$ - потокосцепления нагрузки по осям.

Напряжение подаваемое на обмотки ротора

$$u_{vr} = -U_m \sin \varphi; \quad u_{ur} = -U_m \cos \varphi, \quad (12)$$

где U_m - максимальное значение напряжения.

Полученные уравнения (12) - (14) значительно проще исходных и не содержат переменных коэффициентов.

Для конкретных расчетов, полученные уравнения подвергаем преобразованиям, приняв за переменную состояния системы потокосцепление, что значительно упрощает запись системы в явном виде. Тогда уравнения автономной системы в стандартной форме запишутся как [3]

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{us}}{dt} &= C_{11}\psi_{ur} + C_{12}(\omega_k - \omega_r)\psi_{ur} + C_{13}\psi_{us} + C_{14}\psi_{vs} + \psi_{ur}; \\ \frac{d\psi_{vr}}{dt} &= C_{21}(\omega_k - \omega_r)\psi_{ur} + C_{22}\psi_{ur} + C_{23}\psi_{us} + C_{24}\psi_{vs} + \psi_{vr}; \\ \frac{d\psi_{us}}{dt} &= C_{31}\psi_{ur} + C_{32}\psi_{vr} + C_{33}\psi_{us} + C_{34}\omega_k\psi_{vs}; \\ \frac{d\psi_{vs}}{dt} &= C_{41}\psi_{ur} + C_{42}\psi_{vr} + C_{43}\omega_k\psi_{us} + C_{44}\psi_{vs}, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

для определения токов были получены следующие уравнения

$$\left. \begin{aligned} i_{ur} &= C_{51}\psi_{ur} + C_{52}\psi_{vr} + C_{53}\psi_{us} + C_{54}\psi_{vs}; \\ i_{vr} &= C_{61}\psi_{ur} + C_{62}\psi_{vr} + C_{63}\psi_{us} + C_{64}\psi_{vs}; \\ i_{us} &= C_{71}\psi_{ur} + C_{72}\psi_{vr} + C_{73}\psi_{us} + C_{74}\psi_{vs}; \\ i_{vs} &= C_{81}\psi_{ur} + C_{82}\psi_{vr} + C_{83}\psi_{us} + C_{84}\psi_{vs}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где $C_{11} \dots C_{84}$ - коэффициенты зависящие от первичных параметров машины $R_r, R_s, L_s, L_r, M_r, M_s, M_{rs}$.

Реальные фазные токи ротора найдем как

$$\begin{aligned} i_a &= i_{ur} \cos \gamma + i_{vr} \sin \gamma; \quad i_e = i_{ur} \cos(\gamma - p120^\circ) + i_{vr} \sin(\gamma - p120^\circ); \\ i_c &= i_{ur} \cos(\gamma + p120^\circ) + i_{vr} \sin(\gamma + p120^\circ); \quad I_a = \sqrt{i_{ur}^2 + i_{vr}^2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Остальные токи и напряжения определяются аналогично и с использованием уравнений (14).

Переходные процессы в системе были исследованы путем проведения численных экспериментов на вышеприведенной математической модели.

Для решения дифференциальных уравнений высокого порядка использовалась программа «MathCAD», при этом за основу был взят метод Эйлера. Шаг интегрирования в соответствии с условием $|f(x_0) - f(x_1)| > 10^{-3}$ принят равным $\Delta \tau = 10^{-3}$ эл. сек.

Пример расчета процессов в режиме холостого хода генератора при переменных скорости ротора и напряжения подаваемого на обмотку ротора приведен на рис.2. Расчеты проведены для следующих исходных данных: $R_r = 0,817$ Ом, $R_s = 4,8$ Ом, $L_r = 0,026$ Гн, $L_s = 0,194$ Гн, $M_r = 0,32 \cdot 10^{-3}$ Гн, $M_s = 0,078$ Гн, $M_{rs} = 0,04$ Гн, $p = 3$, $\omega_k = 104,7$ рад/с, $\omega_{r1} = 94,23$ рад/с, $\omega_{r2} = 115,17$ рад/с, $u_{urk} = 30$ В, $u_{ur1} = 35$ В, $u_{ur2} = 25$ В, $u_{vrk} = 30$ В, $u_{vr1} = 35$ В, $u_{vr2} = 35$ В, $t_1 = 0,4$ с, $t_2 = 0,8$ с, $t_3 = 1,2$ с, $t_4 = 1,6$ с, t_5

$\approx 2,0$ с. Начальные условия $i_a(0), i_b(0), i_c(0) = 0$, $\omega_r(0) = 94,23$ рад/с, $u_{ur}(0), u_{vr}(0) = 35$ В. По результатам расчетов построены графики $i_a, i_b, i_c, u_A = f(t)$.

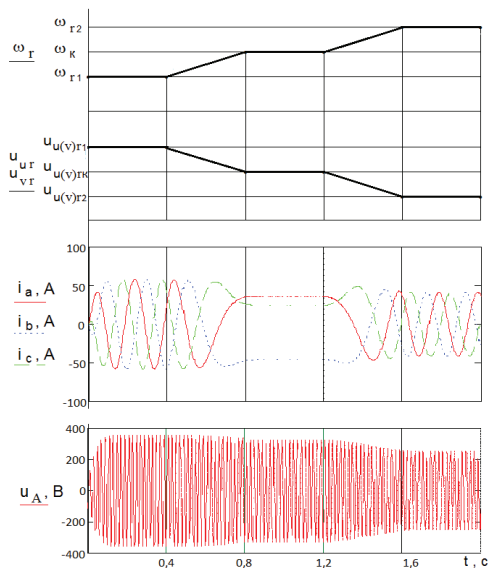


Рисунок 2 – Диаграммы токов ротора и напряжения на фазе статора при переменных скорости ротора и напряжения на фазе ротора

Как видно из рисунка, при изменении скорости от 94,23 рад/с до 104,7 рад/с частота тока ротора изменяется от 5 до 0 Гц, от 104,7 рад/с до 115,17 рад/с – от 0 до 5 Гц с изменением чередования фаз. Тем самым обеспечивается постоянство частоты напряжения на обмотках статора машины. Величина напряжения на статоре изменяется в зависимости от величины тока ротора и скорости ротора. Аналогичная картина наблюдается и при моделировании процессов при работе генератора под нагрузкой.

Заключение. Разработана математическая модель позволяющая рассчитывать переходные процессы в генераторе на базе асинхронного двигателя с фазным ротором. При составлении модели учтены особенности конструкции электрической машины, падение напряжения в кабельной линии и электромагнитная инерция индуктивностей в электрической цепи. Путем моделирования показана возможность стабилизации частоты выходного напряжения генератора трехфазным током возбуждения подаваемого на ротор и регулируемого по величине, частоте и чередованию фаз.

Литература

- [1] Кешуов С.А., Кротов Л.Д., Ордатаев О.Б. Экспериментальное определение взаимной индуктивности обмоток статора и ротора генератора на базе асинхронного двигателя с фазным ротором // Вестник НАН Республики Казахстан. – 2014 (4) с.65 -71.
- [2] Ордатаев О.Б. Определение закона изменения тока возбуждения автономного асинхронного генератора // Известия НАН Республики Казахстан. – 2013 (14) с.70 -74.

[3] Keshuov., O.Ordatayev. Choosing of the excitation current of the autonomous asynchronous generator with phase-wound rotor// Far East Journal of Electronics and Communications. – 2013. Vol.11, P.23-34.

Контакты:

Кешуов Сейтказы Асылсеитович, доктор технических наук, профессор кафедры “Энергосбережения и автоматика”, КазНАУ, генеральный директор КазНИИМЭСХ, г. Алматы, Казахстан, раб. тел.: +7 (727) 247 96 00, моб. тел.: +7 777 236 90 01, E-mail: keshuov@mail.ru

Ордатаев Оркен Бахытбекович, магистр, старший преподаватель кафедры “Энергосбережения и автоматика”, КазНАУ, г. Алматы, Казахстан, старший научный сотрудник КазНИИМЭСХ, г. Алматы, Казахстан, раб. тел.: +7 (727) 247 96 00, моб. тел.: +7 701 245 13 13, E-mail: ordataevorken@mail.ru

Докладът е рецензиран.

