

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ДВУМЯ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ

© Цеслік С., 2005

Запропоновано математичну модель електроенергетичної системи, яка складається з двох електромеханічних джерел енергії. На основі цієї моделі можна розробити цифрову модель для симуляційних досліджень перехідних і усталених процесів такої автономної електроенергетичної системи.

The mathematical model of stand-alone power system is presented in this paper. Analyzed system contains: two electromechanical electric power sources (based on the capacitor-excited induction generator), two diode rectifiers, the direct current intermediary circuit, three-phase transistor converter and three-phase electric load. Presented model was base to work out the computer program. The program was used to simulation steady and transient state of the stand-alone power system.

Сущность проблемы. Автономные электроэнергетические системы представляют собой совокупность генерирующих, передающих и преобразующих устройств, причем ни одно генерирующее устройство не обеспечивает стабильного напряжения в процессе изменения нагрузки. С учетом возможных аварий в больших электроэнергетических системах возрастает роль автономных систем генерирования и регулирования электрической энергии. Такие системы могут быть использованы в так называемых технологических парках, создаваемых в последнее время. Особенностью функционирования таких систем является возможность самовозбуждения или относительно быстрого приведения системы в состояние готовности. Сущность баланса энергии является причиной поиска решений, которые гарантируют стабильность работы автономных электроэнергетических систем в широком спектре нагрузок. Одним из возможных решений является включение источников электроэнергии в работу с одновременной возможностью регулирования потоков энергии в самой автономной установке.

В литературных источниках достаточно широко проанализирована работа автономных индукционных генераторов с самовозбуждением [1], а выводы, которые там получены, обуславливают широкое использование таких источников энергии. С учетом изменения скорости ротора генераторов (например, в ветрогенераторной установке), а также изменения скольжения при изменении нагрузки, актуальной становится проблема стабилизации работы устройств, которые питаются от трехфазных источников различной частоты. Одним из таких решений есть использование промежуточной цепи постоянного тока и транзисторного преобразователя в роли инвертора. При проектировании автономных электроэнергетических систем, в которых должны работать два источника энергии, обязательным является анализ условий, при которых становится возможность такой одновременной работы как в установившихся, так и в переходных режимах работы системы.

Целью данной работы является разработка математической модели автономной электро-энергетической системы с двумя источниками, являющимися индукционными конденсаторными генераторами с самовозбуждением, соединенных посредством цепи постоянного тока, с которой через инвертор питаются трехфазные нагрузки. Модель должна быть основанием для разработки компьютерных программ, которые служат для симуляционных исследований работы такой системы.

Обзор литературы. Принципы регулирования автономных индукционных генераторов рассмотрены в работе [1], но, кроме этого, существует много работ, используя которые можно утверждать, что использование генераторов индукционных с самовозбуждением в таких системах имеет смысл. Эти работы способствовали увеличению интереса исследователей к анализу совместной работы такого типа машин в автономных системах. В работах [2, 3] предложен способ анализа установившихся процессов в индукционных генераторах, работающих параллельно. Электромагнитные переходные процессы при параллельной работе таких генераторов проанализировано в работах [4, 5]. Предложенная модель расширяет возможности анализа работы автономных электроэнергетических систем, базирующихся на индукционных конденсаторных генераторах и позволяет проводить широкие исследования такого типа систем.

Задачи исследования. Автор рассматривает автономную электроэнергетическую систему, функциональная схема которой показана на рис. 1. Первичной энергией является энергия, например: ветра (ветрогенератор), воды (водный генератор) или энергия, получаемая от сжигания газа.

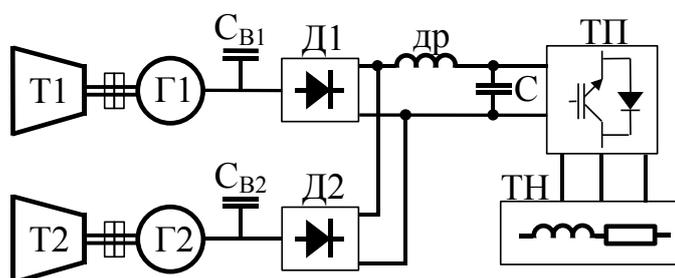


Рис. 1. Функциональная схема моделируемой системы

Первичная энергия обуславливает движение турбин T1 и T2, валы которых соединены с роторами индукционных машин Г1 и Г2. Считаем, что механическое соединение жесткое (нет люфтов). Электрические машины Г1 и Г2 являются преобразователями механической энергии в электрическую, причем это преобразование является возможным, благодаря подключению возбуждающих конденсаторов $C_{в1}$ и $C_{в2}$. Использование конденсаторов обеспечивает реактивную энергию для намагничивания магнитопроводов машин. В общем случае частота напряжения, генерируемого машинами, различна, и чаще всего изменяется с изменениями скорости вращения роторов, а также вследствие изменения скольжения, обусловленного изменением нагрузки машин. Поэтому непосредственное соединение выводов машин невозможно. Решением такой проблемы может быть использование промежуточной цепи постоянного тока, в роли которой выступают диодные выпрямители Д1 и Д2, подсоединенные параллельно со стороны постоянного тока. Энергия с выпрямителей передается через дроссель dr и конденсатор C к транзисторному преобразователю энергии ТП (на практике широко используются системы интеллектуальных модулей мощности). К выходу преобразователя ТП подключены потребители электроэнергии ТН (в общем случае несимметричные трехфазные).

В предложенной системе появляются научно-технические проблемы, которые автор предлагает решить с использованием разработанной математической модели и созданной на ее базе компьютерной программы. Одной из проблем является определение условий, гарантирующих самовозбуждение системы. Естественно, что для начального возбуждения машин Г1 и Г2 нужна энергия. Исследования процесса самовозбуждения конденсаторных индукционных генераторов [6] показали, что начальная энергия может быть получена с остаточного магнитного поля машины, или (если имеем дело с машиной размагниченной) процесс самовозбуждения может начаться даже за счет внешнего электромагнитного поля, в среде которого находится машина – следует заметить, что такой способ самовозбуждения имеет случайный характер. В то же время не исследовалась совместная работа нескольких машин в процессе самовозбуждения. Иная проблема, которая может быть исследована с использованием предложенной модели, является определение условий регулирования потоком энергии рассматриваемых машин. Это возможно с помощью реактивной энергии

Ветви, в которых имеются полупроводниковые ключи, заменены резисторами, сопротивление которых изменяется в зависимости от состояния ключа: большое сопротивление (обуславливает пренебрежительно малый ток ключей относительно токов, которые протекают в других ветвях цепи) в закрытом состоянии ключа и малое сопротивление (обуславливает пренебрежительно малое падение напряжения на ключах относительно к значению напряжения, имеющегося на других элементах цепи) в открытом состоянии ключа.

Электромеханическое состояние индукционной машины в переходных режимах описывается следующими уравнениями:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \Psi + R \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \\ \Omega_m = \frac{1}{p} \frac{d}{dt} \vartheta \\ T_e + T_s = J \frac{d}{dt} \Omega_m \end{cases}, \quad (1)$$

где $\Psi = [\Psi_A \ \Psi_B \ \Psi_C \ \Psi_a \ \Psi_b \ \Psi_c]^T$ – вектор потокосцепления обмоток статора и ротора;

$R = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{diag}(R_A, R_B, R_C) & 0 \\ 0 & \text{diag}(R_a, R_b, R_c) \end{bmatrix}$ – матрица сопротивлений обмоток статора

и ротора машины (приведены к статору); $i_s = [i_A \ i_B \ i_C]^T$, $i_r = [i_a \ i_b \ i_c]^T$ – вектор фазных токов обмоток статора и ротора; $u = [u_A \ u_B \ u_C]^T$ – вектор фазных напряжений обмоток статора; Ω_m – угловая скорость ротора; ϑ – электрический угол поворота ротора; p – количество пар полюсов машины; T_e – электромагнитный момент машины; T_s – момент на валу ротора; J – момент инерции ротора и механизма.

Для использования математической модели, которая состоит из системы дифференциальных уравнений, используется неявный метод Гира, согласно которому производные заменяют

выражением $\frac{d}{dt} y = b_0 y + \sum_{j=1}^g b_j y_j$, где y_j – значение функции в моменты t_j ; b_0 и b_j – коэффициенты

выражения, представляющего производную [7]. С учетом этого система уравнений (1) преобразуется к виду:

$$\begin{cases} b_0 \Psi + \sum_{j=1}^g b_j \Psi_j + R \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \\ -J \left(b_0 \Omega_m + \sum_{j=1}^g b_j \Omega_{mj} \right) + T_e + T_s = 0 \\ \Omega_m = \frac{1}{p} \left(b_0 \vartheta + \sum_{j=1}^g b_j \vartheta_j \right) \end{cases} \quad (2)$$

Выражения математической модели касаются индукционных машин, в которые входит неизвестный вектор $Z = [i_s \ i_r \ \vartheta \ u]^T$, имеют следующий вид:

$$\begin{bmatrix} b_0 L_{ss}^{(i-1)} + R_s & b_0 L_{sr}^{(i-1)} & b_0 K_s^{(i-1)} & Y \\ b_0 L_{rs}^{(i-1)} & b_0 L_{rr}^{(i-1)} + R_r & b_0 K_r^{(i-1)} & 0 \\ b_0 K_s^T{}^{(i-1)} & b_0 K_r^T{}^{(i-1)} & b_0 G^{(i-1)} - b_0^3 J & 0 \end{bmatrix} \Delta Z^{(i)} = -f^{(i-1)}, \quad (3)$$

где $\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$, $\Delta \mathbf{Z}^{(i)} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{i}_s^{(i)} & \Delta \mathbf{i}_r^{(i)} & \Delta \mathcal{G}^{(i)} & \Delta \mathbf{u}^{(i)} \end{bmatrix}^T$ – вектор, приращенный на i -й

итерации. Параметры индукционной машины, которые входят в выражение (3), представлены на рис. 3.

Математическая модель рассматриваемой системы состоит из двух систем уравнений типа (3), которые описывают каждую машину, классических уравнений характеристик элементов R, L, C, а также уравнений Кирхгофа для схемы, изображенной на рис. 2 (с учетом очевидности эти уравнения здесь не приведены). Таким образом, получена математическая модель в нормальной форме Коши. Созданная данным способом модель системы послужила основанием для разработки компьютерной программы, которая дала возможность исследовать различные режимы работы системы.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{\Gamma}^{(i-1)} &= \begin{bmatrix} \cos(p\mathcal{G}^{(i-1)}) & \sin(p\mathcal{G}^{(i-1)}) \\ -\sin(p\mathcal{G}^{(i-1)}) & \cos(p\mathcal{G}^{(i-1)}) \end{bmatrix}; & \mathbf{\Gamma}_9^{(i-1)} &= \frac{d\mathbf{\Gamma}^{(i-1)}}{d\mathcal{G}} = p \begin{bmatrix} -\sin(p\mathcal{G}^{(i-1)}) & \cos(p\mathcal{G}^{(i-1)}) \\ -\cos(p\mathcal{G}^{(i-1)}) & -\sin(p\mathcal{G}^{(i-1)}) \end{bmatrix}; \\
 \mathbf{i}_\mu^{(i-1)} &= \begin{bmatrix} i_{\mu x}^{(i-1)} & i_{\mu y}^{(i-1)} \end{bmatrix}^T = \mathbf{\Gamma}^{T(i-1)} \mathbf{C}^T \mathbf{i}_r^{(i-1)} + \mathbf{C}^T \mathbf{i}_s^{(i-1)}; & i_\mu^{(i-1)} &= \left| \mathbf{i}_\mu^{(i-1)} \right| = \sqrt{\left(i_{\mu x}^{(i-1)} \right)^2 + \left(i_{\mu y}^{(i-1)} \right)^2}; \\
 & & \Psi_\mu^{(i-1)} &= \Psi_\mu \left(i_\mu^{(i-1)} \right); \\
 \Psi_\mu^{(i-1)} &= \begin{bmatrix} \Psi_{\mu x}^{(i-1)} & \Psi_{\mu y}^{(i-1)} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \frac{\Psi_\mu^{(i-1)} i_{\mu x}^{(i-1)}}{i_\mu^{(i-1)}} & \frac{\Psi_\mu^{(i-1)} i_{\mu y}^{(i-1)}}{i_\mu^{(i-1)}} \end{bmatrix}^T; & T_e^{(i-1)} &= \Psi_\mu^{T(i-1)} \mathbf{\Gamma}_9^{T(i-1)} \mathbf{C}^T \mathbf{i}_r^{(i-1)}; \\
 \mathbf{L}_\mu^{(i-1)} &= \frac{1}{\left(i_\mu^{(i-1)} \right)^2} \begin{bmatrix} \frac{d\Psi_\mu^{(i-1)}}{di_\mu^{(i-1)}} \left(i_{\mu x}^{(i-1)} \right)^2 + \frac{\Psi_\mu^{(i-1)}}{i_\mu^{(i-1)}} \left(i_{\mu y}^{(i-1)} \right)^2 & \left(\frac{d\Psi_\mu^{(i-1)}}{di_\mu^{(i-1)}} - \frac{\Psi_\mu^{(i-1)}}{i_\mu^{(i-1)}} \right) i_{\mu x}^{(i-1)} i_{\mu y}^{(i-1)} \\ \left(\frac{d\Psi_\mu^{(i-1)}}{di_\mu^{(i-1)}} - \frac{\Psi_\mu^{(i-1)}}{i_\mu^{(i-1)}} \right) i_{\mu y}^{(i-1)} i_{\mu x}^{(i-1)} & \frac{d\Psi_\mu^{(i-1)}}{di_\mu^{(i-1)}} \left(i_{\mu y}^{(i-1)} \right)^2 + \frac{\Psi_\mu^{(i-1)}}{i_\mu^{(i-1)}} \left(i_{\mu x}^{(i-1)} \right)^2 \end{bmatrix}; \\
 \mathbf{L}_{ss}^{(i-1)} &= \mathbf{C} \mathbf{L}_\mu^{(i-1)} \mathbf{C}^T + \mathbf{L}_{os}; & \mathbf{L}_{rr}^{(i-1)} &= \mathbf{C} \mathbf{\Gamma}^{(i-1)} \mathbf{L}_\mu^{(i-1)} \mathbf{\Gamma}^{T(i-1)} \mathbf{C}^T + \mathbf{L}_{or}; & \mathbf{K}_s^{(i-1)} &= \mathbf{C} \mathbf{L}_\mu^{(i-1)} \mathbf{\Gamma}_9^{T(i-1)} \mathbf{C}^T \mathbf{i}_r^{(i-1)}; \\
 \mathbf{L}_{sr}^{(i-1)} &= \mathbf{C} \mathbf{L}_\mu^{(i-1)} \mathbf{\Gamma}^{T(i-1)} \mathbf{C}^T; & \mathbf{L}_{rs}^{(i-1)} &= \mathbf{L}_{sr}^{(i-1)}; & \mathbf{K}_r^{(i-1)} &= \mathbf{C} \mathbf{\Gamma}^{(i-1)} \mathbf{L}_\mu^{(i-1)} \mathbf{\Gamma}_9^{T(i-1)} \mathbf{C}^T \mathbf{i}_r^{(i-1)} + \mathbf{C} \mathbf{\Gamma}_9^{(i-1)} \Psi_\mu^{(i-1)}; \\
 \mathbf{G}^{(i-1)} &= \mathbf{i}_r^{T(i-1)} \mathbf{C} \mathbf{\Gamma}_9^{(i-1)} \mathbf{L}_\mu^{(i-1)} \mathbf{\Gamma}_9^{T(i-1)} \mathbf{C}^T \mathbf{i}_r^{(i-1)} - p^2 \mathbf{i}_r^{T(i-1)} \mathbf{C} \mathbf{\Gamma}^{(i-1)} \Psi_\mu^{(i-1)}; & \Psi^{(i-1)} &= \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{os} \mathbf{i}_s^{(i-1)} + \mathbf{C} \Psi_\mu^{(i-1)} \\ \mathbf{L}_{or} \mathbf{i}_r^{(i-1)} + \mathbf{C} \mathbf{\Gamma}^{(i-1)} \Psi_\mu^{(i-1)} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Рис. 3. Совокупность выражений для определения параметров индукционной машины

На рис. 4 показаны отдельные результаты симуляционных исследований процесса подключения нагрузки к системе с машинами мощностью 2,2 и 5,5 кВт. Во время $t < 2$ с произошло самовозбуждение машин без нагрузки. Самовозбуждение ещё не закончилось, когда во время $t = 2$ с была подключена трехфазная несимметричная нагрузка. Начальный фрагмент переходного процесса, обусловленного подключением нагрузки, показан на примере протекания токов фазы А статора машины Г1 (кривая 1 на рис. 4), машины Г2 (кривая 2 на рис. 4), токов фазы А нагрузки ТН (кривая 3 на рис. 4), а также напряжения на конденсаторе С (кривая 4 на рис. 4). Анализ работы системы можно производить на основании изучения различных физических величин в моделированной системе.

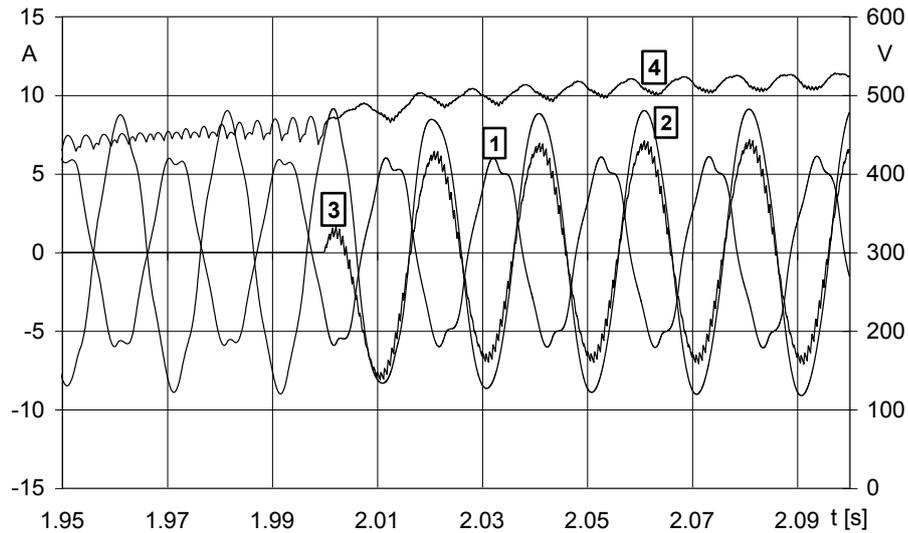


Рис. 4. Фрагмент результатов симуляционных исследований системы

Выводы. Предложена математическая модель автономной электроэнергетической системы дала возможность разработать компьютерную программу для ее использования при исследовании различных состояний такой системы. Учет нелинейности характеристик намагничивания магнитопроводов машин является обязательным условием с учетом специфики работы самовозбуждающихся систем с индукционными генераторами и конденсаторным возбуждением. Исследования, проведенные с использованием разработанной математической модели, позволяют утверждать, что возможна совместная работа параллельно двух электромеханических источников электроэнергии, которые генерируют напряжения различной частоты. Следует заметить, что остается проблема обеспечения качественной электроэнергии, которая поступает к нагрузке, а также исследования стабильности работы такой системы при динамических изменениях нагрузки.

1. Cieslik S.: *Control strategies for stand-alone squirrel-cage induction generators* // *XV Seminar on Electrical Engineering, Istebna-Zaolzie. – Poland, 2001. – Vol. 13. – P. 73–78.* 2. Al-Bahrani A.H., Malik N.H. *Voltage control of parallel operated self excited induction generators* // *IEEE Transactions on Energy Conversion. – June 1993. – Vol. 8, N 2. – 236 p.* 3. Chakraborty Ch., Bhadra S.N., Chattopadhyay A.K.: *Analysis of parallel-operated self-excited induction generators* // *IEEE Transactions on Energy Conversion. – June 1999. – Vol. 14, N 2. – 209 p.* 4. Li Wang, Ching-Huei Lee. *Dynamic analyses of parallel operated self-excited induction generators feeding an induction motor load* // *IEEE Transactions on Energy Conversion/ – September 1999. – Vol. 14, N 3. – 479 p.* 5. Ching-Huei Lee, Li Wang. *A novel analysis of parallel operated self-excited induction generators* // *IEEE Transactions on Energy Conversion. – June 1998. – Vol. 13, N 2. – 117 p.* 6. Cieslik S. *Mathematical modelling of self-excitation of stand-alone electric generator* // *Proceedings of 23rd International Seminar on Fundamentals of Electrotechnics and Circuit Theory, Gliwice/Ustroń. – Poland, 24–27 May 2000. – P. 167–170.* 7. Chua L.O., Lin Pen-Min. *Computer-aided analysis of electronic circuits. Algorithms and computational techniques*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1975.