

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОМАШИННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ В MATLAB SIMULINK

¹Кулешова Е.О., ¹Шишка Н.В.

¹ФГБОУ ВПО «НИ ТПУ» («Национальный исследовательский Томский политехнический университет»), Томск, Россия (634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30), e-mail: kuleshova@tpu.ru,

Проведено исследование статической устойчивости одномашинной энергосистемы, синхронный генератор которой оборудован автоматическим регулятором возбуждения сильного действия (АРВ СД). В качестве возмущения, вызывающего переходный процесс в энергосистеме, было принято отклонение активной мощности генератора от номинального. Параметрами регулирования являются генераторное напряжение и частота вращения ротора генератора. Энергосистема описывается системой нелинейных дифференциально-алгебраических уравнений, для упрощения которой используется метод линеаризации. В среде Matlab Simulink было смоделировано решение линеаризованной системы дифференциальных уравнений, описывающих энергосистему, с помощью передаточных функций. Правильность моделирования была подтверждена расчетами корней характеристического уравнения. В результате моделирования были получены графики по отклонению частоты и напряжения от номинальных значений. Выбраны коэффициенты усиления АРВ по отношению напряжения, по первой и второй производным напряжения.

Ключевые слова: переходный процесс, энергосистема, мощность, напряжение, генератор, частота, статическая устойчивость, коэффициенты усиления, моделирование.

SIMULATION OF ONE-MACHINE POWER SYSTEM WITH HELP TRANSFER FUNCTIONS IN MATLAB SIMULINK

¹Kuleshova E.O., ¹Shishka N.V.

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk Polytechnic University, TPU, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Lenin prospect, 30), e-mail: kuleshova@tpu.ru, nosov@elti.tpu.ru

A study of static stability of one-machine power system. Synchronous generator of this power system equipped automatic control of excitation (ACE) strong action. As the disturbances that cause the transition in power system was made deviation active power of the generator from the nominal power. Parameters of regulation are the generator voltage and frequency of the rotor of the generator. The power system is described by a system of nonlinear differential-algebraic equations. To simplify this the system using the method of linearization. In Matlab Simulink environment was simulated solution of the linearized system of differential equations describing the power system, with help of transfer functions. Confirmed the correctness of simulation calculations of the roots of the characteristic equation. As a result of modeling were obtained the charts of deviation the frequency and voltage from the nominal values. Were selected coefficients gain ACE.

Keywords: transition process, the power, power, power, generator, frequency, static stability, gain, simulation.

Введение

Устойчивость системы характеризует способность системы возвращаться в состояние равновесия после исчезновения внешних сил, которые вывели ее из этого состояния. Следовательно, только устойчивая система является работоспособной.

На все переходные процессы в энергосистемах действуют возмущения – начальные отклонения от номинальных параметров режима. Это могут быть отклонения значений токов, напряжений, мощностей и других параметров.

Для исследования статической устойчивости энергосистемы необходимо составить систему дифференциальных уравнений переходных процессов. Решение такой системы

является сложной задачей. Для упрощения дифференциальных уравнений, описывающих энергосистему, был использован метод линеаризации «в малом» [5; 6].

В среде Matlab Simulink было смоделировано решение линеаризованной системы дифференциальных уравнений.

Для наглядности расчета коэффициентов характеристического уравнения зададимся исходными данными для схемы, представленной на рис. 1 [5].

Математическая модель энергосистемы

Для описания энергосистемы с помощью передаточных функций рассмотрим одномашинную энергосистему (рис. 1), синхронный генератор которой оборудован автоматическим регулятором возбуждения сильного действия (АРВ СД). Система дифференциальных уравнений переходных процессов для данной энергосистемы имеет вид [1]:

$$\frac{T_j}{\omega_c} p^2 \delta = P_T - P, \quad (1)$$

$$E_q = E_{qe} + E_{qcv}, \quad (2)$$

$$E_{qcv} = -T_{d0} p E'_q, \quad (3)$$

$$E_{qe} = E_{qe0} + \frac{1}{(pT_e + 1)(pT_p + 1)} \sum_j \left[K_{0Rj} + \frac{pK_{1Rj}}{pT_d + 1} + \frac{p^2 K_{2Rj}}{(pT_d + 1)^2} \right] (R_j - R_{0j}). \quad (4)$$

Линеаризация функции независимой переменной уравнений (1-4) приводит к производной малого приращения этой функции [5]. В результате получим линейную систему вида:

$$\frac{T_j}{\omega_c} p^2 \Delta \delta = -\Delta P. \quad (5)$$

Линеаризация уравнения (5) проводится относительно угла δ и синхронной ЭДС E_q .

Приращение угла δ пропорционально частоте вращения ротора генератора:

$$\Delta f = p \Delta \delta, \quad (6)$$

$$\Delta f = p \left(\frac{-\Delta P \cdot \omega_c}{T_j \cdot p^2} \right) = \frac{-\Delta P \cdot \omega_c}{T_j \cdot p}, \quad (7)$$

$$\Delta E_q = \frac{\left[(K_{0U} + pK_{1U})(-\Delta U_r) + (K_{0f} + pK_{1f}) \Delta f \right] \frac{T_{d0} p \cdot \frac{\partial E'_q}{\partial \delta} \cdot \Delta \delta}{\left(1 + \frac{\partial E'_q}{\partial E_q} T_{d0} p \right)}}{(pT_e + 1)(pT_p + 1) \left(1 + \frac{\partial E'_q}{\partial E_q} T_{d0} p \right)}, \quad (8)$$

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial P}{\partial E_q} \Delta E_q, \quad (9)$$

$$\Delta U_\Gamma = \frac{\partial U_\Gamma}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial U_\Gamma}{\partial E_q} \Delta E_q. \quad (10)$$

В совокупности уравнения (5-10) составляют математическую модель энергосистемы.

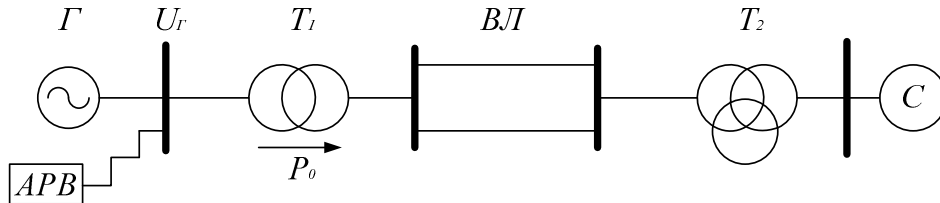


Рис. 1. Схема одномашинной энергосистемы

Для рассматриваемой одномашинной энергосистемы в качестве варьируемого параметра режима была принята активная мощность генератора. Параметрами регулирования являются модуль U_Γ вектора генераторного напряжения \underline{U}_Γ и частоту f вращения ротора генератора.

Параметры схемы

Примем следующие типы электрооборудования и параметры [4]:

Генератор Г является эквивалентом двух турбогенераторов типа ТГВ-200-2УЗ.

Трансформатор Т1 является эквивалентом двух трансформаторов типа ТДЦ-250000/220.

Трансформатор Т2 является эквивалентом двух групп однофазных трансформаторов типа АТДЦТН-250000/220/110.

Линия ВЛ – двухцепная, выполнена проводом марки АСО-300 с параметрами: длина $L = 200$ км, $X_0 = 0,429$ Ом/км.

Возбудитель генератора: $T_e = 0,04$ с. **Регулятор** возбуждения: $T_p = 0,04$ с.

Система С: $U_c = 115$ кВ.

Турбина эквивалентного генератора: режим: $P_{m(1)} = 0,5 P_{max}$.

Коэффициенты усиления АРВ: $K_{OU} = 50$ ед. возб. хх*с/ед. напряж., $K_{IU} = 5$ ед. возб. хх*с/ед. напряж.

Расчет коэффициентов

Для исследования установившегося режима энергосистемы запишем формулы частных производных в уравнениях:

$$\frac{\partial P}{\partial \delta} = \frac{E_q U_c}{X_{d\Sigma}} \cos \delta = \frac{E_{q1} U_c}{X_{d\Sigma}} \cos \delta, \quad \frac{\partial P}{\partial E_q} = \frac{U_{c*}}{X_{d\Sigma}} \sin \delta, \quad \frac{\partial E'_q}{\partial \delta} = -U_c \frac{X_d - X'_d}{X_{d\Sigma}},$$

$$\frac{\partial E'_q}{\partial E_q} = \frac{X'_{d\Sigma}}{X_{d\Sigma}}, \quad \frac{\partial U_\Gamma}{\partial \delta} = -\frac{1}{U_\Gamma} \cdot \frac{E_q U_c X_d X_{\Gamma c}}{X_{d\Sigma}^2} \sin \delta,$$

$$\frac{\partial U_\Gamma}{\partial E_q} = -\frac{1}{U_\Gamma} \cdot \frac{X_{\Gamma c}}{X_{d\Sigma}^2} (E_q X_{\Gamma c} + U_c X_d \cos \delta).$$

Моделирование в среде Matlab Simulink

На основе выше полученных расчетов построим одномашинную энергосистему в среде Matlab Simulink [3; 7].

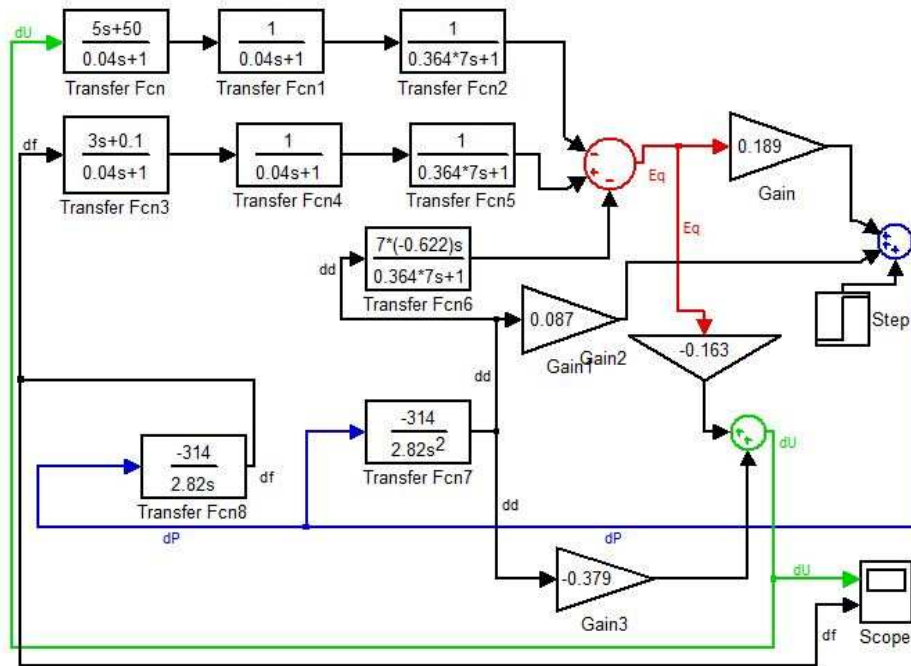


Рис. 2. Схема одномашинной энергосистемы, представленная в среде Matlab Simulink

Фиксируем коэффициенты усиления АРВ K_{OU} и K_{IU} по отклонению напряжения и по первой производной напряжения соответственно. Коэффициенты усиления АРВ K_{of} и K_{If} по отклонению частоты и по первой производной частоты должны попадать в область устойчивости моделируемой энергосистемы. Обычно для определения области устойчивости при проектировании энергосистем с двумя параметрами, влияющими на устойчивость энергосистемы, используют метод D-разбиений [2]. Процедура построения области устойчивости является трудоемкой. Более того, необходимо построение нескольких областей устойчивости при различных режимах работы генератора.

Используя программные средства MatLab Simulink, настройку коэффициентов усиления АРВ K_{of} и K_{If} так, чтобы система была устойчивой, можно выполнить, не прибегая к построению области устойчивости. Выполнить это можно с помощью построения корневого годографа (рис. 3).

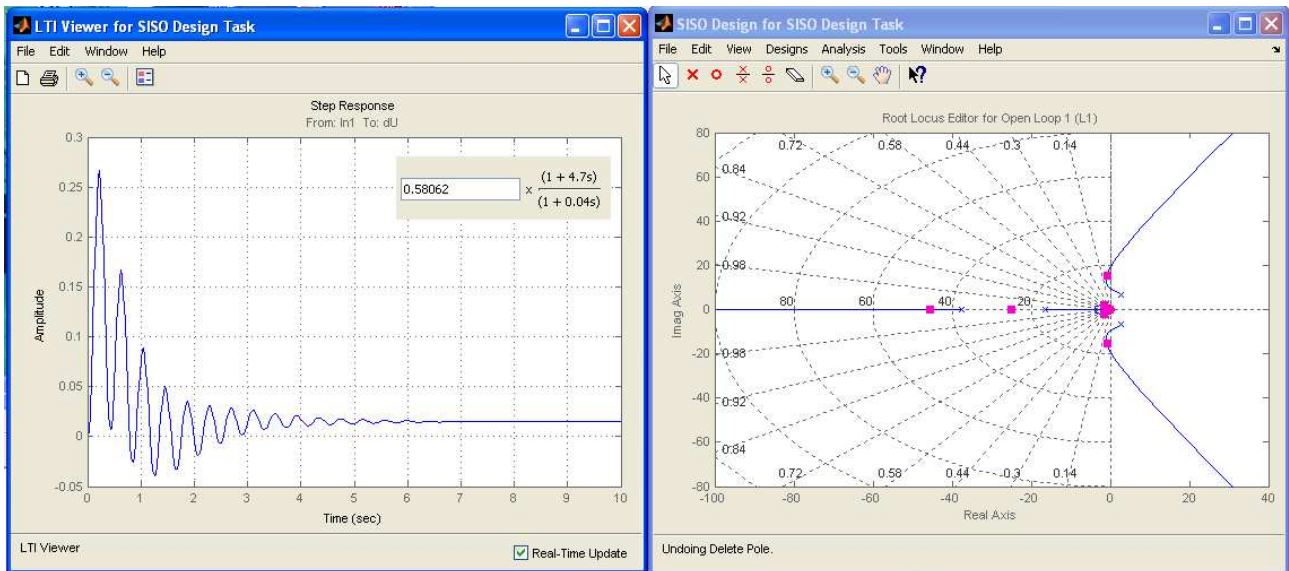
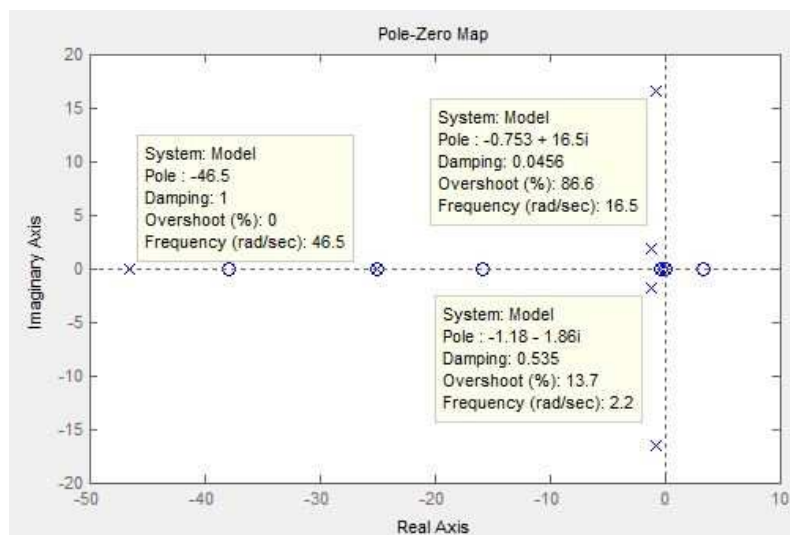


Рис. 3. Использование блока SISO Design Task при настройке коэффициентов K_{of} и K_{If}

В результате моделирования коэффициенты усиления были приняты равными $K_{of}=0,58$ и $K_{If} =2,726$. В качестве проверки нами была построена область устойчивости для данной энергосистемы методом D-разбиений. Найденные коэффициенты попадают в полученную область устойчивости.

При полученных коэффициентах усиления АРВ K_{of} и K_{If} корни характеристического уравнения располагаются в левой комплексной полуплоскости, как это видно на рис. 5. В качестве проверки сравним полюса передаточных функций с расчетами корней характеристического уравнения в MathCad при тех же коэффициентах усиления АРВ.



$$D(p) \text{ solve } p \rightarrow \begin{pmatrix} -46.500207985430451061 \\ -1.1956021353432555921 + 1.8559796850934142387i \\ -1.1956021353432555921 - 1.8559796850934142387i \\ -0.73750839037247843004 - 16.479778612687241233i \\ -0.73750839037247843004 + 16.479778612687241233i \end{pmatrix}$$

Рис. 4. График линейного анализа, показывающий корни характеристического уравнения

Из рис. 3 видно, что отклонение напряжения от заданного значения стремится к нулю, следовательно, система устойчива. Время переходного процесса в среднем составляет 10 с.

Заключение

Моделирование в среде MatLab Simulink позволяет оценить статическую устойчивость энергосистемы, определить время переходного процесса и т.д., не требуя дополнительного расчета коэффициентов характеристического уравнения и построения области устойчивости, что значительно упрощает анализ статической устойчивости энергосистемы.

Список литературы

1. Веников В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики). - Изд. 2-е, доп. и перераб. – М. : Высшая школа, 1976. – 479 с.
2. Ерофеев А.А. Теория автоматического управления : учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Политехника, 2005. – 302 с. : ил.
3. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс. – СПб. : Питер ; Киев : Издательская группа ВНУ, 2005. – 512 с. : ил.
4. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 352 с. : ил.
5. Хрущев Ю.В. Методы расчета устойчивости энергосистем : учебное пособие. – Томск : Изд-во ТПУ, 2005. – 176 с.
6. Хрущев Ю.В., Заповодников К.И., Юшков А.Ю. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах : учебное пособие. – Томск : Изд-во ТПУ, 2010. – 160 с.
7. Shishka N.V., Kuleshova E.O. The description of the one-machine power supply system by means of transfer function // Vedecky Pokrok na Prelomu Tysyachalety : materialy VIII Mezinarodni Vedecko-Prakticka Konference, Prague, 27 May-5 June 2012. – Praha : Education and Science, 2012. - Vol. 29. Technicke vedy. Telovychova a sport. - P. 8-10.

Рецензенты:

Лукути Б.В., д.т.н., профессор, зав. кафедрой ЭПП ЭНИН ФГБОУ ВПО «НИ ТПУ», Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск.

Новиков С.А., д.ф.-м.н., профессор кафедры ЭСиЭ ЭНИН ФГБОУ ВПО «НИ ТПУ», Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск.