

УДК 621.311

АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ
С ГЕНЕРАТОРАМИ С АРВ ПД ПО КОРНЯМ
ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ
ANALYSIS OF THE STATIC STABILITY OF THE SYSTEM
WITH GENERATORS WITH ARV PD BY ROOTS
CHARACTERISTIC EQUATION

И.А. Соловьев, Е.Д. Чекотовская

Научный руководитель – А.А. Волков, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

I. Solovev, E. Chekotovskaia

Supervisor – A. Volkau, Senior Lecturer
Belarusian National Technical University, Minsk

Аннотация: проведены расчеты и анализ статической устойчивости электроэнергетической системы с генераторами с АРВ ПД по корням характеристического уравнения при разных коэффициентах усиления KU и углах δ .

Abstract: Calculations and analysis of the static stability of an electric power system with generators with ARV PD by the roots of the characteristic equation at different gains KU and angles δ have been carried out.

Ключевые слова: статическая устойчивость, регулятор возбуждения генератора, анализ системы, характеристическое уравнение, критерий Гурвица.

Keywords: static stability, generator excitation regulator, system analysis, characteristic equation, Hurwitz criterion.

Введение

Все генераторы современных систем снабжены автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ) [1].

Различают автоматические регуляторы пропорционального типа (АРВ ПД) и автоматические регуляторы сильного действия (АРВ СД). АРВ ПД реагируют на отклонение одного или нескольких параметров режима от контролируемых значений. АРВ СД в свою очередь дополнительно реагируют на скорости и ускорения изменения параметров режима. Введение производных изменения параметров в законы регулирования не только стабилизируют систему регулирования, но и значительно повышает предельную передаваемую мощность (предел устойчивости). АРВ ПД обеспечивают устойчивость режима в меньшем диапазоне изменения угла и передаваемой мощности, по сравнению с АРВ СД [2].

Основная часть

Анализ статической устойчивости режима выполним для простейшей электрической системы с генератором, оснащенным автоматическим регулятором пропорционального действия по отклонению напряжения и

работающим на шины с неизменным напряжением (рисунок 1). Переходный процесс описывается системой уравнений, включающей в себя:

- уравнение относительного движения ротора генератора:

$$(T_J / \omega_0) \cdot d^2 \delta / dt^2 = P_0 - E_q U \sin \delta / x_d; \quad (1)$$

- уравнение переходного процесса в роторе генератора:

$$T_{d0} \cdot dE'_q / dt + E_q = E_{q,e}; \quad (2)$$

- уравнение переходного процесса в цепи возбуждения генератора:

$$T_e \cdot dE_{q,e} / dt + E_{q,e} = U_p. \quad (3)$$

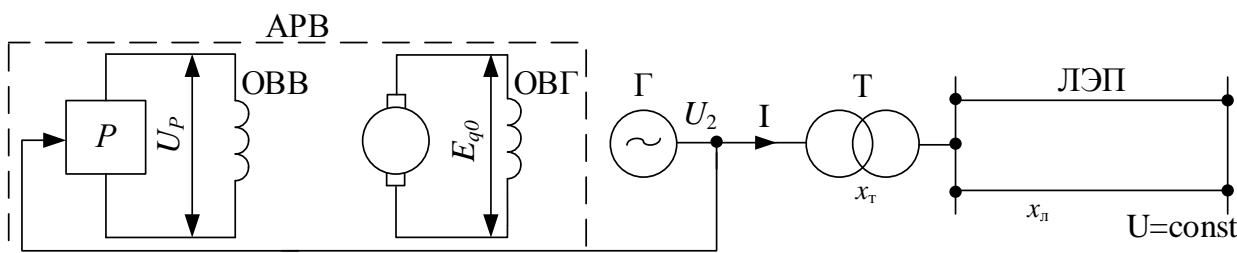


Рисунок 1 – Схема простейшей электрической системы с генератором с АРВ ПД

Величины, входящие в данные уравнения, означают:

- T_{d0} – постоянная времени обмотки возбуждения генератора (ОВГ) при разомкнутой обмотке статора;
- T_J – постоянная механической инерции генератора;
- x_d – индуктивное сопротивление генератора в относительных единицах;
- E'_q и E_q – переходная и синхронная продольные ЭДС;
- $E_{q,e}$ – ЭДС в установившемся режиме (равна в относительных единицах измерению напряжению возбуждателя);
- T_e – постоянная времени обмотки возбуждения возбуждателя (ОВВ);
- U_p – установившееся значение напряжения ОВВ (равно в относительных единицах измерению напряжению на выходе регулятора).

Уравнение идеального автоматического регулятора напряжения пропорционального типа, мгновенно изменяющего напряжение на ОВВ пропорционально отклонению напряжения на зажимах генератора:

$$U_p - U_{p,0} = -K_U \cdot (U_\Gamma - U_{\Gamma,0}). \quad (4)$$

Характеристическое уравнение имеет следующий вид [1]:

$$a_0 p^4 + a_1 p^3 + (a_2 + K_U \Delta_2) p^2 + a_3 p + a_4 + K_U \Delta_4 = 0, \quad (5)$$

где:

$$a_0 = \frac{T_J}{\omega_0} T_{d0} T_e \frac{\partial E'_q}{\partial E_q}; \quad (6)$$

$$a_1 = \frac{T_J}{\omega_0} \left(T_e + T_{d0} \frac{\partial E'_q}{\partial E_q} \right); \quad (7)$$

$$a_2 = \frac{T_J}{\omega_0} + T_{d0} T_e \left(\frac{\partial E'_q}{\partial E_q} \cdot \frac{\partial P}{\partial \delta} - \frac{\partial E'_q}{\partial \delta} \cdot \frac{\partial P}{\partial E_q} \right); \quad (8)$$

$$a_3 = T_{d0} \left(\frac{\partial E'_q}{\partial E_q} \cdot \frac{\partial P}{\partial \delta} - \frac{\partial E'_q}{\partial \delta} \cdot \frac{\partial P}{\partial E_q} \right); \quad (9)$$

$$a_4 = \frac{\partial P}{\partial \delta}; \quad (10)$$

$$\Delta_2 = \frac{T_j}{\omega_0} \cdot \frac{\partial U_\Gamma}{\partial E_q}; \quad (11)$$

$$\Delta_4 = \left(\frac{\partial U_\Gamma}{\partial E_q} \cdot \frac{\partial P}{\partial \delta} - \frac{\partial U_\Gamma}{\partial \delta} \cdot \frac{\partial P}{\partial E_q} \right). \quad (12)$$

Подставив в формулы (6)–(12) частные производные, получим:

$$a_0 = \frac{T_J}{\omega_0} T'_d T_e; \quad (13)$$

$$a_1 = \frac{T_J}{\omega_0} (T'_d + T_e); \quad (14)$$

$$a_2 = \frac{T_J}{\omega_0} + T'_d T_e \left(\frac{E_q U}{X_d} \cos \delta + U^2 \frac{X_d - X'_d}{X_d X'_d} \sin^2 \delta \right); \quad (15)$$

$$a_3 = T'_d \left(\frac{E_q U}{X_d} \cos \delta + U^2 \frac{X_d - X'_d}{X_d X'_d} \sin^2 \delta \right) + T_e \frac{E_q U}{X_d} \cos \delta; \quad (16)$$

$$a_4 = \frac{E_q U}{X_d} \cos \delta; \quad (17)$$

$$\Delta_2 = \frac{T_j}{\omega_0} \cdot \frac{X_{\text{вн}}}{X_d}; \quad (18)$$

$$\Delta_4 = \left(\frac{E_q U}{X_d} \cos \delta + U^2 \frac{X_d - X_{BH}}{X_d X_{BH}} \sin^2 \delta \right) \frac{X_{BH}}{X_d} \quad (19)$$

где:

$$T'_d = T_{d0} \frac{X'_d}{X_d};$$

$$E_q = \frac{E_{q0} + K_U \left(U_{Г,0} - U_C \cos \delta \frac{X_d - X_{BH}}{X_d} \right)}{1 + K_U \frac{X_{BH}}{X_d}};$$

$$X_{BH} = x_T + \frac{x_{II}}{n_{II}}.$$

Полученная система уравнений (13)–(19), являющаяся совокупностью корней характеристического уравнения (5), основой всего исследования.

Итоговые параметры электрической системы (рисунок 2), на базе которых производится исследование, сведены в таблицу 1 и 2.

В качестве генератора с АРВ ПД возьмем ТГВ-300-2У3 [3] с постоянной времени T_{d0} равной 7,0 с.

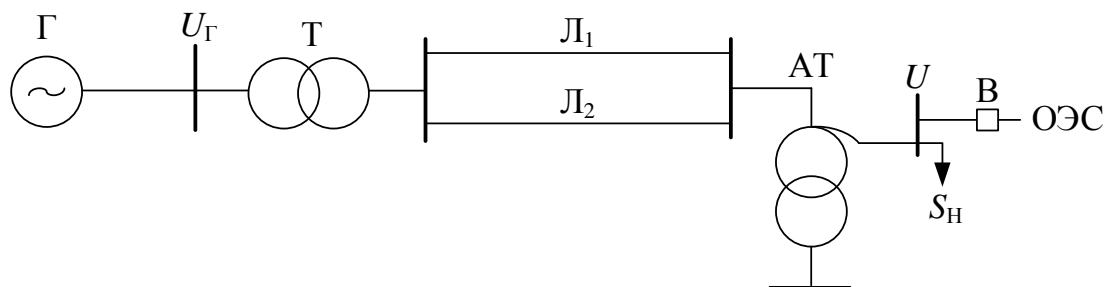


Рисунок 2 – Схема электрической системы

Таблица 1 – Параметры электрической системы

$T_j, с$	$T_e, с$	$T'_d, с$	U	E_{q0}	X_d	X''_d	X_{BH}	ω_0
12,5	2,0	2,08	1	2,909	2,076	0,617	0,411	314,0

В характеристическом уравнении (5), исходя из системы (13)–(19) видно, что коэффициенты a_0 – a_4 не зависят от регулирования возбуждения, а значит они определяют устойчивость режима нерегулируемой электрической системы. Единичные прибавки Δ_2 и Δ_4 к соответствующим по индексу коэффициентам характеристического уравнения, пропорциональные коэффициенту усиления, отображают воздействие устройства АРВ ПД. Для упрощенного применения критерия Гурвица в (5) заменим отношения коэффициентов a_i с соответствующими им Δ_i на эквивалент a'_i , который является коэффициентом, отражающим получаемое воздействие от регулятора возбуждения, и будем подставлять его при поиске определителя матрицы:

$$a'_2 = a_2 + K_U \Delta_2; \tag{20}$$

$$a'_4 = a_4 + K_U \Delta_4. \tag{21}$$

Из вышеперечисленного следует, что определители Гурвица будут иметь следующий вид:

$$\Delta_{\text{Гур1}} = a_1; \tag{22}$$

$$\Delta_{\text{Гур2}} = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a'_2 \end{vmatrix}; \tag{23}$$

$$\Delta_{\text{Гур3}} = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a'_2 & a'_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix}; \tag{24}$$

$$\Delta_{\text{Гур4}} = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 & 0 \\ a_0 & a'_2 & a'_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & 0 \\ 0 & a_0 & a'_2 & a'_4 \end{vmatrix}. \tag{25}$$

Результаты расчетов коэффициентов характеристического уравнения при различных коэффициентах усиления и выбранных ранее углах δ , сведены в таблицы 2–4 соответственно.

Таблица 2 – Значения коэффициентов характеристического уравнения при $K_U = 0$

угол $\delta, ^\circ$	a_0	a_1	a'_2	a_3	a'_4
80	0,166	0,162	5,647	3,290	0,243
90	0,166	0,162	4,778	2,369	0
110	0,166	0,162	2,230	0,137	-0,479

Таблица 3 – Значения коэффициентов характеристического уравнения при $K_U = 30$

угол $\delta, ^\circ$	a_0	a_1	a'_2	a_3	a'_4
80	0,166	0,162	6,517	3,912	9,306
90	0,166	0,162	5,014	2,369	6,780
110	0,166	0,162	-0,011	-2,293	-1,494

Таблица 4 – Значения коэффициентов характеристического уравнения при $K_U = 100$

угол $\delta, ^\circ$	a_0	a_1	a'_2	a_3	a'_4
80	0,166	0,162	7,140	3,982	30,410
90	0,166	0,162	5,566	2,369	22,60
110	0,166	0,162	0,264	-2,563	-3,841

Таблица 5 – Значения определителей Гурвица при $K_U = 0$

угол δ , °	$\Delta_{Гур1}$	$\Delta_{Гур2}$	$\Delta_{Гур3}$	$\Delta_{Гур4}$
80	0,162	0,369	1,207	0,293
90	0,162	0,381	0,902	0
110	0,162	0,339	0,059	-0,028

По полученным данным из таблиц 2–4 составлены определители Гурвица. Полученные значения определителей при K_U равных 30 и 100 и различных углах δ сведены в таблицы 5–7 соответственно.

Таблица 6 – Значения определителей Гурвица при $K_U = 30$

угол δ , °	$\Delta_{Гур1}$	$\Delta_{Гур2}$	$\Delta_{Гур3}$	$\Delta_{Гур4}$
80	0,162	0,406	1,345	12,521
90	0,162	0,419	0,815	5,524
110	0,162	0,379	-0,830	1,239

Таблица 7 – Значения определителей при Гурвица $K_U = 100$

угол δ , °	$\Delta_{Гур1}$	$\Delta_{Гур2}$	$\Delta_{Гур3}$	$\Delta_{Гур4}$
80	0,162	0,496	1,176	35,752
90	0,162	0,508	0,611	13,817
110	0,162	0,468	-1,099	4,222

Сравнительный анализ результатов расчета значений коэффициентов характеристического уравнения и определителей Гурвица показывает, что:

- при нулевом коэффициенте усиления (без АРВ ПД) при угле δ равном 90° наблюдается граница устойчивости. Это выражено коэффициентами a'_4 и $\Delta_{Гур4}$, которые равняются нулю. При дальнейшем повышении угла δ система становится неустойчивой (таблицы 2 и 5);
- при коэффициенте усиления АРВ ПД K_U равном 30 проявление отрицательного знака у коэффициентов характеристического уравнения начинаются с a'_2 , при угле δ равном 110° , а при $K_U = 100$ проявление отрицательного знака проявляется, начиная с a_3 при том же угле δ ;
- влияние угла δ распространяется на полиномы a'_2 , a_3 и a'_4 , т. к. согласно уравнениям (13)–(19) именно его изменение в большую или меньшую сторону изменяет значение данных коэффициентов характеристического уравнения.

Заключение

В ходе работы был проведен анализ статической устойчивости электроэнергетической системы с генератором ТГВ-300-2У3 с АРВ ПД по корням характеристического уравнения при коэффициентах усиления K_U равных 30 и 100, а также при различных углах δ .

Устройства АРВ позволяют увеличить предел передаваемой мощности и положительно влияют на устойчивость электроэнергетической системы.

При отсутствии у генератора АРВ предельный режим имеет место при угле $\delta = 90^\circ$, а при наличии возможности регулирования возбуждения устойчивость повышается:

- при $K_U = 30$ предел устойчивости достигается при угле $\delta = 100,3^\circ$;
- при $K_U = 100$ предел устойчивости достигается при угле $\delta = 97,5^\circ$.

Литература

1. Веников, В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учебник для электроэнергетических специальностей вузов / В. А. Веников. – Изд. 4-е. – М. : Высш. шк., 1985. – 536 с.
2. Переходные процессы в системах электроснабжения: учебник для вузов / Г. Г. Пивняк [и др.]. – Изд. 3-е. – М. : Энергокомиздат : Днепропетровск : НГУ, 2003. – 548 с.
3. Неклепаев, Ю. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: справочные материалы для курсового и дипломного проектирования / Ю. Н. Неклепаев, И. П. Крючков. – Изд. 4-е. – М. : Энергостандарт, 1989. – 608 с.