

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ПАВЛОДАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им.С.ТОРАЙГЫРОВА



4'2003



ПМУ хабаршысы
Вестник ПГУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.313.322.016.351

УРАВНЕНИЯ И ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ

В.Ф. Говорун, О.В. Говорун

Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова

Өз бетінше қоздыру жүйелерінің математикалық моделі ұсынылды. Электрлік жүйенің статикалық тұрақтылығын зерттеулерде модель қолданылуы мүмкін.

Предложена математическая модель системы самовозбуждения. Модель может быть использована при исследовании статической устойчивости электрических систем.

The mathematical model of self-excitation system are offered. The model may be used in research work of the statical stability of a electrical systems.

Быстродействующие системы возбуждения мощных генераторов выполняются обычно по двухгрупповой схеме с параллельным включением тиристорных преобразователей на стороне постоянного тока.

Математические модели возбудительных систем в большинстве случаев можно составлять, учитывая лишь одну группу преобразователей. Это обусловлено тем, что в установившихся режимах генератора форсировочная группа тиристоров загружена незначительно и на режим работы рабочей группы оказывает достаточно малое влияние. В режимах форсирования возбуждения, наоборот, можно пренебречь влиянием рабочей группы [1].

Рассмотрим внешние характеристики систем статического возбуждения с учетом характеристик систем управления их преобразователями.

Принципиальная схема силовой части системы самовозбуждения, установленной на генераторах Павлодарской ТЭЦ-3, представляет собой последовательное соединение трансформаторов напряжения (T_1) и тока (T_2) с последующим присоединением к управляемой выпрямительной установке (рисунок 1).

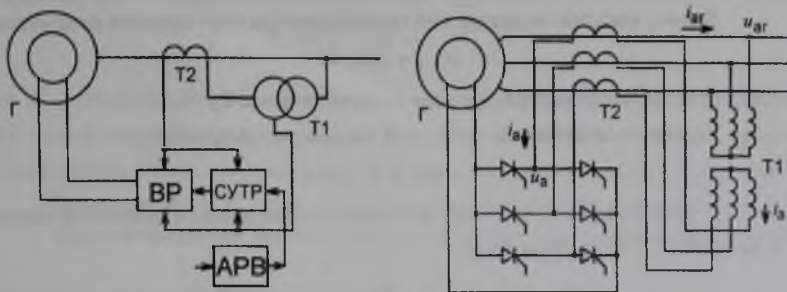


Рис. 1

Принципиальная схема системы самовозбуждения и схема замещения

Внешнюю характеристику одногрупповой системы силового фазового компаундирования при работе мостового выпрямителя в режиме 2 - 3 запишем в относительных единицах, принятых А.А. Горевым для уравнения обмотки возбуждения синхронной машины,

$$E_r = E_y \cos \alpha - R_s E_q, \quad (1)$$

где $E_r = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_y$; $R_s = \frac{3X_y}{\pi}$; E_y – амплитудное значение фазной э.д.с. коммутации, X_y – реактивность коммутации, α – угол регулирования.

Заметим, что внешняя характеристика возбудителя определялась при не учете активных сопротивлений в цепи переменного тока преобразователя, тока намагничивания трансформатора T_1 и насыщения стали обоих трансформаторов.

Для нахождения связи э.д.с. E_y с током и напряжением статорной цепи генератора используем выражения для фазных напряжений, приложенных к преобразователю.

Для трансформатора T_1 уравнение запишем в виде

$$U_{1k} = \frac{U_{r_k}}{K_1} - X_1 \frac{di_k}{\omega_c dt}, \quad (2)$$

где $k = a, b, c$, U_{r_k} , i_k – напряжение и ток вторичной обмотки k -ой фазы генератора, X_1 – суммарное индуктивное сопротивление рассеяния, приведенное к вторичной стороне, K_1 – коэффициент трансформации параллельного (T_1) трансформатора.

Для последовательного трансформатора уравнение запишем с учетом токов намагничивания, т.е.:

$$U_{2k} = \omega_2 \frac{d\varphi_k}{dt} - X_2 \frac{di_k}{\omega_c dt}, \quad (3)$$

где φ_k – магнитный поток фазы; U_{2k} – напряжение на вторичной стороне; X_2 , ω_2 – индуктивное сопротивление рассеяния и число витков вторичной обмотки.

Баланс намагничивающих сил трансформатора определяется равенством

$$\omega_1 i_{rk} = \omega_2 (i_k + i_{\mu k}), \quad (4)$$

где i_k – ток фазы генератора; $i_{\mu k}$ – ток намагничивания T_2 .

Принимая линейность магнитной характеристики, имеем:

$$\omega_2 \varphi_k = X'_\mu i_{\mu k} / \omega_c, \quad (5)$$

где X'_μ – реактивность шунта намагничивания, приведенная к вторичной обмотке.

Уравнения (3 -5) приведем к виду:

$$U_{2k} = K_2 X'_\mu \frac{di_{rk}}{\omega_c dt} - (X_2 + X'_\mu) \frac{di_k}{\omega_c dt}, \quad (6)$$

Используя (3) и (6), запишем уравнение для фазного напряжения, приложенного к выпрямителю:

$$U_k = \frac{U_{rk}}{K_1} + K_2 X'_\mu \frac{di_{rk}}{\omega_c dt} - (X_1 + X_2 + X'_\mu) \frac{di_k}{\omega_c dt}, \quad (7)$$

При сделанных допущениях, из (7) видно, что в качестве коммутирующей ЭДС, следует считать выражение:

$$e_{\mu k} = \frac{U_{rk}}{K_1} + K_2 X'_\mu \frac{di_{rk}}{\omega_c dt} \quad (8)$$

При этом реактивность коммутации определяется равенством $X'_\mu = X'_1 + X'_{22} + X'_\mu$.

Перейдем от мгновенных значений фазных переменных к комплексным амплитудам изображающих векторов, полагая

$$e_a = \operatorname{Re} E e^{j\tau}, U_{\omega} = \operatorname{Re} U_\omega e^{j\tau}, i_{\omega} = \operatorname{Re} i_\omega e^{j\tau},$$

где $E_\gamma = E_{\gamma r} + jE_{\gamma \mu}$, $U_\omega = U_{\omega r} + jU_{\omega \mu}$, $I_\omega = I_{\omega r} + jI_{\omega \mu}$, τ – угол между осью фазы а статора и осью q ротора. Полагая, что $X_\mu = K_2^2 X'_\mu$ и подставив последнее выражение в равенство, определяющее e_{μ} , после преобразований получим:

$$E_r = \frac{U_r}{K_1} + jX_\mu \frac{I_r}{K_2},$$

отсюда следует, что $E_{\mu r} = \frac{U_{\omega r}}{K_1} - X_\mu \frac{I_{\omega \mu}}{K_2}$, $E_{\mu \mu} = \frac{U_{\omega \mu}}{K_1} + X_\mu \frac{I_{\omega r}}{K_2}$.

Запишем последние соотношения, используя d, q – составляющие статорных токов и напряжений в относительных единицах, принимаемых в уравнениях синхронной машины:

$$E_{\mu r} = U_{\omega c} \frac{U_{\omega r}^*}{K_1} - U_{\omega c} X_\mu \frac{I_{\omega \mu}^*}{K_2},$$

$$E_{\mu d} = U_{\delta c} \frac{U_{\mu d}^*}{K_1} + U_{\delta c} X_r^* \frac{I_{\mu}^*}{K_2},$$

где X_r^* – реактивность намагничивания, отнесенная к базисному сопротивлению статорной цепи генератора, $U_{\delta c}$ – базисное напряжение статора, равное амплитудному значению номинального фазного напряжения статора генератора.

Приведем $E_{\mu d}$ и $E_{\mu q}$ к базисному напряжению обмотки возбуждения $U_{\delta p}$.

Опуская звездочки, использованные для обозначения переменных в относительных единицах, и вводя коэффициенты $M_u = \frac{U_{\delta c}}{K_1 U_{\delta p}}$ и $M_l = \frac{U_{\delta c}}{K_2 U_{\delta p}}$,

запишем последние равенства в следующем виде:

$$E_{\mu q} = M_u U_{\mu q} - M_l X_r I_{\mu d},$$

$$E_{\mu d} = M_u U_{\mu d} - M_l X_r I_{\mu q}.$$

В принятых относительных единицах уравнение внешней характеристики будет:

$$e_r = E_r \cos \alpha - R_s E_q,$$

где $E_r = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_f = NE_f$, $R_s = \frac{3X_r}{\pi}$, $E_q = \sqrt{E_m^2 + E^2}$.

Линсаризация уравнений возбудительной системы даёт:

$$\Delta e_r = E_{r0} \cos \alpha_0 \frac{\Delta E_r}{E_{r0}} - E_{r0} \sin \alpha_0 \Delta \alpha - R_s \Delta E_q, \quad (9)$$

$$\Delta E_r = N \Delta E_f, \Delta E_f = \frac{E_{\mu q0}}{E_{f0}} \Delta E_{\mu q} + \frac{E_{\mu d0}}{E_{f0}} \Delta E_{\mu d},$$

$$\Delta E_{\mu q} = M_u \Delta U_{\mu q} - M_l X_r \Delta I_{\mu d},$$

$$\Delta E_{\mu d} = M_u \Delta U_{\mu d} - M_l X_r \Delta I_{\mu q}.$$

При определении вариации угла управления учтем, что преобразователь оснащен системой управления, в которой момент формирования управляющего импульса определяется равенством:

$$U_p = U^{(1)} \cos \alpha, \quad (10)$$

где U_p – напряжение выхода регулятора; $U^{(1)}$ – амплитудное значение первой гармоники напряжения на зажимах преобразователя.

Отсюда следует, что:

$$\Delta \alpha = E_{r0} \frac{\Delta U^{(1)} \cos \alpha_0}{U_0^{(1)} \sin \alpha_0} - \frac{\Delta U_p}{U_0^{(1)} \sin \alpha_0},$$

На данном этапе исследования удобно считать $U^{(1)}$ и U_p определенными в принятых выше относительных единицах и приведенными к основной цели питания преобразователя.

С учетом последнего равенства уравнение (4) имеет вид:

$$\Delta E_r = E_{r_0} \frac{\Delta U_p}{U_0^{(1)}} + E_{r_0} \cos \alpha_0 \frac{\Delta E_r}{E_{r_0}} - E_{r_0} \cos \alpha_0 \frac{\Delta U^{(1)}}{U_0^{(1)}} - R_s \Delta E_q, \quad (11)$$

Связь напряжения $U^{(1)}$ с основными переменными можно установить следующим образом. В [2] приведены выражения для d , q составляющих первой гармоники тока цепи питания преобразователя.

$$I_d^{(1)} = b(\alpha, \gamma) E_{\gamma d} + g(\alpha, \gamma) E_{\gamma l},$$

$$I_q^{(1)} = g(\alpha, \gamma) E_{\gamma q} - b(\alpha, \gamma) E_{\gamma l},$$

Для режима 2-3 преобразователя нелинейные проводимости $g(\alpha, \gamma)$ и $b(\alpha, \gamma)$ определяются выражениями:

$$g(\alpha, \gamma) = \frac{3}{2\pi X_\gamma} [\sin^2(\alpha + \gamma) - \sin^2 \alpha],$$

$$b(\alpha, \gamma) = \frac{3}{2\pi X_\gamma} [\sin^2(\alpha + \gamma) \cos(\alpha + \gamma) - \sin \alpha \cos(\alpha + \gamma)],$$

или в более удобной для последующей линеаризации форме:

$$g(\alpha, \gamma) = \frac{3}{2\pi X_\gamma} [\sin \gamma \sin(2\alpha + \gamma)],$$

$$b(\alpha, \gamma) = \frac{3}{2\pi X_\gamma} [\sin \gamma \cos(2\alpha + \gamma) - \gamma].$$

Уравнения, определяющие d , q составляющие первой гармоники напряжения на зажимах моста, имеют вид:

$$U_q^{(1)} = E_{\gamma q} + X_\gamma I_d^{(1)}, \quad U_d^{(1)} = E_{\gamma d} - X_\gamma I_q^{(1)},$$

$$U_q^{(1)} = (1 + B) E_{\gamma q} + G E_{\gamma d}, \quad U_d^{(1)} = (1 + B) E_{\gamma d} + G E_{\gamma q},$$

$$B = \frac{3}{2\pi} [\sin \gamma \cos(2\alpha + \gamma) - \gamma], \quad G = \frac{3}{2\pi} [\sin \gamma \sin(2\alpha + \gamma)].$$

Если в приведенных выше уравнениях $E_{\gamma d}$ и $E_{\gamma q}$ подставлять в относительных единицах, то $U_q^{(1)}$ и $U_d^{(1)}$ будут определены в тех же единицах. После линеаризации равенств и преобразований получим:

$$U_q^{(1)} = (1 + B_0) \Delta E_{\gamma q} + \Delta B \Delta E_{\gamma d} + G_0 \Delta E_{\gamma d} + \Delta G \Delta E_{\gamma d},$$

$$U_d^{(1)} = (1 + B_0) \Delta E_{\gamma d} + \Delta B \Delta E_{\gamma q} - G_0 \Delta E_{\gamma q} - \Delta G \Delta E_{\gamma q},$$

$$\Delta B = -\frac{3}{2\pi} [1 - \cos 2(\alpha_0 + \gamma_0)] \Delta \gamma - \frac{3}{\pi} \sin \gamma_0 \sin(2\alpha_0 + \gamma_0) \Delta \alpha,$$

$$\Delta G = \frac{3}{2\pi} \sin \alpha_0 \sin(2\alpha_0 + \gamma_0) \Delta \alpha.$$

Приращение первой гармоники напряжения определяется равенством:

$$\Delta U^{(1)} = \frac{U_{\varphi_0}^{(1)}}{U_0^{(1)}} \Delta U_{\varphi}^{(1)} + \frac{U_{\alpha_0}^{(1)}}{U_0^{(1)}} \Delta U_{\alpha}^{(1)},$$

Для связи угла коммутации γ с прочими переменными используем известное соотношение:

$$e_r = \frac{1}{2} E_r [\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)],$$

которое после линеаризации можно привести к виду:

$$\Delta e_r = e_{r_0} \frac{\Delta E_r}{E_{r_0}} - \frac{1}{2} E_{r_0} [\sin \alpha_0 - \sin(\alpha_0 + \gamma_0)] \Delta \alpha - \frac{1}{2} E_{r_0} \sin(\alpha_0 + \gamma_0) \Delta \gamma.$$

При учете фильтра в цепи первой гармоники напряжения равенство (5) имеет вид: $U_p = U_{\max}^{(1)} \cos[\alpha + \beta(\omega)]$, где $U_{\max}^{(1)}$ – амплитудное значение первой гармоники напряжения на выходе фильтра, $\beta(\omega)$ – угол наклона фазовой характеристики, создаваемый фильтром.

Связь напряжений $U^{(1)}$ с $U_{\max}^{(1)}$ при этом определяется частотной характеристикой фильтра вида:

$$W_{\varphi}(j\Omega) = \frac{j\Omega T}{1 + j\Omega T_1 + (j\Omega)^2 T_2^2 + (j\Omega)^3 T_3^3}, \quad (12)$$

Последняя получена на основании схемы, показанной в однофазном изображении на рисунке 2 и условии, что входные и выходные сигналы фильтра могут быть заменены двумя гармоническими сигналами, равными номинальной частоте $\omega_0 = 314$ рад/с и приращениями частоты $\Delta\omega$, т.е. $\Omega = \omega_0 \pm \Delta\omega$.

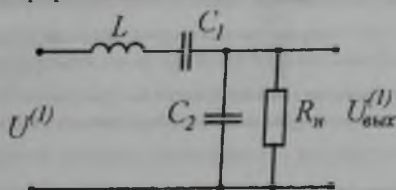


Рис. 2

Схема фильтра первой гармоники в однофазном исполнении

При параметрах фильтра $L=1$ Гн, $C_1=10$ мкФ, $C_2=2$ мкФ и $R_n=800$ Ом имеем:

$$T = RC_1 = 8 \cdot 10^{-3} \text{ с}, \quad T_1 = R_n(C_1 + C_2) = 9.6 \cdot 10^{-3} \text{ с},$$

$$T_2^2 = LC_1 = 1 \cdot 10^{-5} \text{ с}^2, \quad T_3^3 = R_n LC_1 C_2 = 9.6 \cdot 10^{-9} \text{ с}^3.$$

Заметим, что непосредственное использование уравнения (9) затруднено в связи с нелинейной зависимостью частотных характеристик фильтра от $\Delta\omega$. Вместе с тем, расчеты показали, что если отклонения частоты не превышают нескольких процентов, то изменения амплитудной и фазовой характеристик напряжения первой

гармоники в фильтре весьма малы. В частности, при $\Delta\omega = 0.02\omega_0$ амплитуда $U^{(1)}$ изменяется приблизительно на 0.01%, а фазовый сдвиг, создаваемый фильтром, составляет $\beta(\omega) = 3^\circ$. Очевидно, что это позволит в ряде расчетов не учитывать инерционность в фильтре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Говорун В.Ф., Груздев И.А. Методика учета систем самовозбуждения с АРВ сильного действия при анализе статической устойчивости //Труды ЛПИ.–1974.– №340.–С.26-32.
2. Соколов Н.И. Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах /Под ред. Н.И. Соколова.–Л.: Энергия, 1970.–399 с.