

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ, ОБОРУДОВАННЫХ СИСТЕМАМИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ И АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПО НЕСКОЛЬКИМ ПАРАМЕТРАМ

Р. И. БОРИСОВ, Ю. В. ХРУЩЕВ

(Представлена кафедрой электрических систем и сетей)

Расчеты апериодической устойчивости энергосистем по знаку свободного члена характеристического уравнения с использованием обобщенных статических характеристик генераторов и узлов нагрузки в виде регулирующих эффектов получили свое выражение и развитие в работах [1, 2].

Дальнейшее развитие и применение этой методики, особенно для дальних передач переменного тока с промежуточными присоединениями, оказывается весьма перспективным.

Можно уточнить статические характеристики генераторов учетом устройств автоматического регулирования возбуждения (АРВ) и автоматического регулирования турбин (АРТ). Регулирование вращающего момента турбин может производиться по частоте, по отклонению абсолютного угла вылета ротора и относительного угла между векторами эдс и напряжения на выводах. Регулирование возбуждения может осуществляться по любым режимным параметрам или по группе параметров одновременно. Учет этих факторов становится необходимостью в оценке устойчивости современных энергосистем.

Как показано, зависимости активной и реактивной мощностей генератора в функции от напряжения на выводах, эдс, угла между ними и частоты могут быть определены следующим образом:

$$P = \frac{e_d u}{x_d} \sin \delta_r + \frac{u^2}{2} \frac{x_d - x_q}{\omega x_d x_q} \sin 2\delta_r, \quad (1)$$

$$Q = \frac{e_d u}{x_d} \cos \delta_r - \frac{u^2}{\omega x_d} \left(1 + \frac{x_d - x_q}{x_q} \sin^2 \delta_r \right). \quad (2)$$

При пропорциональном АРТ по указанным параметрам вращающий момент турбины может определиться следующим уравнением:

$$M_r = M_{r0} + n_\omega (\omega - \omega_0) + n_\delta (\delta - \delta_0) + n_{\delta_r} (\delta_r - \delta_{r0}), \quad (3)$$

где n_ω , n_δ , n_{δ_r} — коэффициенты усиления по частоте, абсолютному и относительному углам.

Для системы АРВ, действующей на отклонения группы параметров, справедливо уравнение

$$e_d = e_{d0} + k_u (u - u_0) + k_\omega (\omega - \omega_0) + k_\delta (\delta - \delta_0) + \\ + k_{\delta_r} (\delta_r - \delta_{r0}) + k_p (P - P_0) + k_Q (Q - Q_0), \quad (4)$$

где под k обозначены общие коэффициенты усиления по отклонениям параметров, указанных в индексах.

Перепишем эти уравнения, считая отдаваемую генератором мощность отрицательной нагрузкой

$$P = -\omega M_r = -\omega M_{эм} \quad (5)$$

и принимая во внимание равенство

$$\delta_r = \delta - \delta_u. \quad (6)$$

Тогда

$$P = -\omega [M_{r0} + n_\omega(\omega - \omega_0) + n_\delta(\delta - \delta_0) + n_{\delta_r}(\delta - \delta_u - \delta_{r0})],$$

$$P = -\frac{e_d u}{x_d} \sin(\delta - \delta_u) - \frac{u^2}{2} \frac{x_d - x_q}{\omega x_d x_q} \sin 2(\delta - \delta_u),$$

$$Q = -\frac{e_d u}{x_d} \cos(\delta - \delta_u) + \frac{u^2}{\omega x_d} \left[1 + \frac{x_d - x_q}{x_q} \sin^2(\delta - \delta_u) \right],$$

$$e_d = e_{d0} + k_u(u - u_0) + k_\omega(\omega - \omega_0) + k_\delta(\delta - \delta_0) + \\ + k_{\delta_r}(\delta_r - \delta_{r0}) + k_p(P - P_0) + k_Q(Q - Q_0).$$

Полученная система уравнений (7) позволяет построить четыре характеристики по трем переменным. Анализ влияния исходных условий на статистические характеристики генератора в общем виде требует большого объема вычислительной работы и целесообразен, очевидно, в конкретно поставленных задачах.

Для установления влияния коэффициентов усиления АРВ и АРТ на статические характеристики запишем систему уравнений (7) в конечных приращениях:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= -(M_{r0} + n_\omega \omega_0) \Delta \omega - \omega_0 n_\delta \Delta \delta - \omega_0 n_{\delta_r} \Delta \delta + \omega_0 n_{\delta_r} \Delta \delta_u = \\ &= m_0 \Delta \omega - \omega_0 (n_\delta + n_{\delta_r}) \Delta \delta + \omega_0 n_{\delta_r} \Delta \delta_u, \\ \Delta P &= \frac{\partial P}{\partial e_d} \Delta e_d + \frac{\partial P}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial P}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial P}{\partial \omega} \Delta \omega, \\ \Delta Q &= \frac{\partial Q}{\partial e_d} \Delta e_d + \frac{\partial Q}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial Q}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial Q}{\partial \omega} \Delta \omega, \\ \Delta e_d &= (\kappa_\delta + \kappa_{\delta_r}) \Delta \delta + \kappa_p \Delta P + \kappa_Q \Delta Q + \kappa_u \Delta u - \kappa_{\delta_r} \Delta \delta_u + \kappa_\omega \Delta \omega, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $m_0 = -(M_{r0} + \omega_0 n_\omega)$,

$\frac{\partial P}{\partial}$, $\frac{\partial Q}{\partial}$ — частные производные активной и реактивной мощностей генератора.

Нулевым индексом обозначены параметры исходного режима. Добавки за счет несоответствия параметров исходного режима и уставок измерительных элементов отнесены к M_{r0} .

Преобразуем систему уравнений (8), исключив из нее приращения $\Delta \delta$ и Δe_d :

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= p_u \Delta u + p_{\delta_u} \Delta \delta_u + p_\omega \Delta \omega, \\ \Delta Q &= q_u \Delta u + q_{\delta_u} \Delta \delta_u + q_\omega \Delta \omega. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

В произвольно выбранной системе единиц выражения p и q являются коэффициентами крутизны статических характеристик [3] активной и реактивной мощностей генератора по напряжению на выводах,

фазе и частоте. Для определения коэффициентов крутизны регулируемого генератора систему уравнений запишем в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} 0 & -\omega_0(n_\delta + n_{\delta\Gamma}) & -1 & 0 \\ \frac{\partial P}{\partial e_d} & \frac{\partial P}{\partial \delta} & -1 & 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial e_d} & \frac{\partial Q}{\partial \delta} & 0 & -1 \\ -1 & \kappa_\delta + \kappa_{\delta\Gamma} & \kappa_p & \kappa_Q \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta e_d \\ \Delta \delta \\ \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \\ = - \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 n_{\delta\Gamma} & m_0 \\ \frac{\partial P}{\partial u} & \frac{\partial P}{\partial \delta_u} & \frac{\partial P}{\partial \omega} \\ \frac{\partial Q}{\partial u} & \frac{\partial Q}{\partial \delta_u} & \frac{\partial Q}{\partial \omega} \\ \kappa_u & -\kappa_{\delta\Gamma} & \kappa_\omega \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta \delta_u \\ \Delta \omega \end{bmatrix} \quad (10)$$

Коэффициенты крутизны получаются в виде отношений двух определителей:

$$p_{\delta_u} = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} 0 & -\omega_0(n_\delta + n_{\delta\Gamma}) & -\omega_0 n_{\delta\Gamma} & 0 \\ \frac{\partial P}{\partial e_d} & \frac{\partial P}{\partial \delta} & -\frac{\partial P}{\partial \delta_u} & 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial e_d} & \frac{\partial Q}{\partial \delta} & -\frac{\partial Q}{\partial \delta_u} & -1 \\ -1 & \kappa_\delta - \kappa_{\delta\Gamma} & \kappa_{\delta\Gamma} & \kappa_Q \end{vmatrix} \quad (11)$$

$$q_{\delta_u} = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} 0 & -\omega_0(n_\delta + n_{\delta\Gamma}) & -1 & -\omega_0 n_{\delta\Gamma} \\ \frac{\partial P}{\partial e_d} & \frac{\partial P}{\partial \delta} & -1 & -\frac{\partial P}{\partial \delta_u} \\ \frac{\partial Q}{\partial e_d} & \frac{\partial Q}{\partial \delta} & 0 & \frac{\partial Q}{\partial \delta_u} \\ -1 & \kappa_\delta + \kappa_{\delta\Gamma} & \kappa_p & \kappa_{\delta\Gamma} \end{vmatrix} \quad (12)$$

Остальные коэффициенты определяются аналогично. Анализ соотношений (11) и (12), а также остальных коэффициентов крутизны позволяет сделать следующие общие для регулируемых синхронных генераторов выводы.

Активная мощность генератора может изменяться в зависимости от фазы напряжения на выводах только при регулировании вращающего момента турбины по абсолютному углу или при одновременном действии АРТ по относительному углу и АРВ по абсолютному углу.

Реактивная мощность зависит от фазы напряжения, если у АРВ или АРТ генератора параметром регулирования является абсолютный угол.

Зависимость активной мощности генератора от модуля напряжения имеет место только при осуществлении АРТ по абсолютному или относительному углам.

От частоты активная мощность зависит при любых законах АРТ и АРВ, если не выполняется условие

$$M_{T0} = n_{\omega} = n_{\delta} = n_{\delta_T} = 0.$$

Реактивная мощность генератора изменяется в соответствии с изменением модуля напряжения на выводах и частоты также при всех законах АРТ и АРВ.

Вопросы регулирования вращающего момента турбины по абсолютному и относительному углам находятся в настоящее время в стадии интенсивных разработок и изучения [4]. Регулирование возбуждения по этим параметрам тоже еще не распространено. Поэтому подавляющее большинство существующих генераторов имеют только три не равных нулю коэффициента крутизны: активной мощности по частоте и реактивной мощности по напряжению и частоте. Такие же зависимости имеют нерегулируемые генераторы [1].

Необходимость использования регулирования по разным параметрам должна изучаться для различных условий работы синхронных генераторов в объединениях энергетических систем.

Приложение

Вывод выражений активной и реактивной мощностей синхронного генератора проведем, исходя из уравнений переходных процессов [5] в статорной обмотке

$$\left. \begin{aligned} u \sin \delta_r + p e_d + r(1 + pT_d) i_d + x_q i_q p\gamma &= 0, \\ u \cos \delta_r - e_d p\gamma - x_d i_d p\gamma + r(1 + pT_q) i_q &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

а также уравнений электромагнитного момента и реактивной мощности

$$M_{эм} = i_d x_q i_q - i_q (x_d i_d + e_d), \quad (14)$$

$$Q = i_d u \cos \delta_r - i_q u \sin \delta_r. \quad (15)$$

Полагая в уравнениях (13) $p\gamma = \omega$, $r = 0$ и переходя к стационарному режиму, находим

$$\left. \begin{aligned} u \sin \delta_r + \omega x_q i_q &= 0, \\ u \cos \delta_r - \omega e_d - \omega x_d i_d &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Исключая в уравнениях (14), (15) токи i_d и i_q с помощью (16), получим

$$M_{эм} = \frac{e_d u}{\omega x_d} \sin \delta_r + \frac{u^2}{2} \frac{x_d - x_q}{\omega^2 x_d x_q} \sin 2\delta_r, \quad (17)$$

$$Q = \frac{e_d u}{x_d} \cos \delta_r - \frac{u^2}{\omega x_d} \left(1 + \frac{x_d - x_q}{x_q} \sin^2 \delta_r \right). \quad (18)$$

Умножая (17) на ω , находим уравнение активной мощности генератора.

$$P = \omega M_{эм} = \frac{e_d u}{x_d} \sin \delta_r + \frac{u^2}{2} \frac{x_d - x_q}{\omega x_d x_q} \sin 2\delta_r. \quad (19)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Л. Левинштейн, О. В. Щербачев. Методика расчета статической устойчивости сложных электрических систем с помощью эквивалентных регулирующих эффектов станций и нагрузок. Изв. вузов СССР. «Энергетика», № 8, 1962.

2. М. Л. Левинштейн, О. В. Щербачев. Упрощение сложных электрических систем для расчетов статической устойчивости. Изв. вузов СССР. «Энергетика», № 12, 1962.

3. Л. М. Зисман. Расчет изменений установившегося режима электрической системы с учетом статических характеристик элементов. Изв. АН СССР. «Энергетика и транспорт», № 3, 1969.

4. В. А. Веников, Д. В. Никитин, В. А. Штробель, В. Б. Рубин. Регулирование турбины как средство улучшения переходных процессов электрических систем. «Электричество», № 2, 1967.

5. Г. В. Михневич. Синтез структуры системы автоматического регулирования возбуждения синхронных машин. Изд. «Наука», М., 1964.
