АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, СНАБЖЕННОЙ АВТОМАТИЧЕСКИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ ВОЗБУЖДЕНИЯ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИИ ЛЯПУНОВА В КВАДРАТИЧНОЙ ФОРМЕ

М.М. Толибжанов
Ташкентский государственный технический университет, г. Ташкент

На современном этапе развития электроэнергетики, для которого характерно внедрение рыночных отношений при производстве и распределении электрической энергии, актуальность проблемы статической устойчивости электроэнергетических систем (ЭЭС) не только не снизилась, но и возросла [1]. Этому способствует появление новых, независимых генерирующих источников, отсутствие общей настройки регулирующих устройств в электрической системе, проблемы, связанные с режимами работы генераторов, в снятии пиков нагрузки и т.д.

Происходит внедрение быстродействующих силовых тиристорных управляющих схем, на основе которых формируются управляемые гибкие электропередачи переменного тока FACTS (Flexible Al-ternative Current Transmission Systems), обеспечивающие высокую управляемость и существенное повышение пределов передаваемой мощности, при высокой надежности эксплуатации ЭЭС.

Синхронные генераторы в современных электрических станциях снабжаются различными типами автоматических регуляторов возбуждения (АРВ), позволяющими реагировать на изменения параметров режима, подавлять колебания, поддерживать постоянным или регулировать по заданному закону выбранный параметр режима.

АРВ позволяют выбрать требуемый закон управления режимом возбуждения и, соответственно, режимом электрической системы, обеспечивающим ее устойчивую работу. В общем случае уравнение электрической системы можно представить в матричной форме [2,4]:

$$x = Ax + Bu$$

$$y = Cx$$

где x – вектор переменных состояния; A – функциональная матрица размером n×n, называемая матрицей состояния системы (матрица коэффициентов уравнений системы); B – функциональная матрица размером n×r, называемая матрицей управления (входа); u – число входов; C – матрица, учитывающая выходные параметры.

Для определения устойчивости можно использовать метод Ляпунова и задаться функцией в виде положительно определенной квадратичной формы :

$$V(x) = x^T Qx$$

где Q – положительно определенная симметрическая матрица.

Производная этой функции

$$dV(x)/dt = d(x^T Qx)/dt$$

приводит к уравнению [4,5]:

$$A^T Q + QA = -C \qquad (1)$$

Уравнение (1), называется матричным уравнением Ляпунова.

Линеаризованные уравнения простейшей ЭЭС при наличии на синхронном генераторе автоматических регуляторов возбуждения пропорционального или сильного действия имеют вид [2,3]:

– уравнение относительного движения ротора синхронной машины:

$$T_j(d^2\Delta\delta/dt) = -P_d(d\Delta\delta/dt) - \Delta P;$$

– уравнение переходных процессов в обмотке возбуждения:

$$T_{do}(\Delta E'_q / dt) = \Delta E_{qe} - \Delta E_q;$$

– уравнение в обмотке возбуждения возбудителя:

$$T_e(\Delta E_{qe} / dt) = k_e \Delta e - \Delta E_{qe}; \qquad (2)$$

– уравнение усилительного элемента:

$$T_y(\Delta e / dt) = k_y \Delta u - \Delta e;$$

– уравнение измерительного элемента:

$$T_u(d\Delta u / dt) = k_u \Delta u_r - \Delta u;$$

– уравнение, отражающее влияние АРВ:

$$\Delta e = \Sigma(k_{0\Pi j} \cdot \Delta \Pi_j + k_{1\Pi j} \Pi_j (d\Delta \Pi_j / dt) + k_{2\Pi j} \Pi_j (d^2 \Delta \Pi_j / dt^2);$$

здесь - T_j, T_{do}, T_e, T_y, $T_и$ - постоянные инерции агрегата, постоянные времени, соответственно - обмотки возбуждения при разомкнутой обмотке статора, возбудителя, усилительного элемента, преобразовательного и измерительного элементов ($T_и = T_п$); $\Delta\delta$, $\Delta E'_q$, ΔE_q , ΔE_{qe}, Δe, Δu, Δu_r - отклонения угла нагрузки, переходной э.д.с., э.д.с. холостого хода, э.д.с. на кольцах ротора, напряжения на обкладках возбудителя и напряжения на шинах генератора; $\Delta \Pi_j$, - параметры режима, по которым осуществляется регулирование возбуждения генератора; P_d - демпферный коэффициент; $k_{0\Pi j}$, $k_{1\Pi j}$, $k_{2\Pi j}$ – коэффициенты усиления по каналам регулирования АРВ, соответственно – по отклонению, по первой и второй производным параметров режима. Отклонения регулируемого параметра режима генератора или системы определяются по соотношению [3]

$$\Delta \Pi_j = (d\Pi_j / d\delta)\Delta\delta + (\Delta \Pi_j / dE_q)\Delta E_q$$

Исследуем статическую устойчивость электрической системы с синхронным генератором, имеющим автоматический регулятор возбуждения пропорционального типа (АРВ-п) на основе уравнений (2).

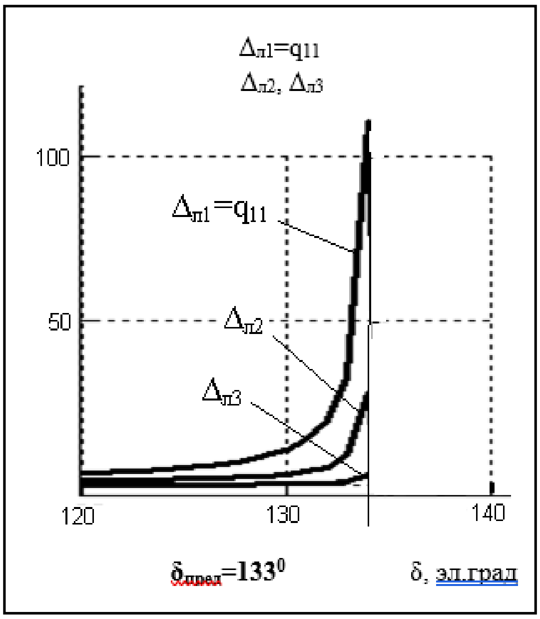

Рис. 1.

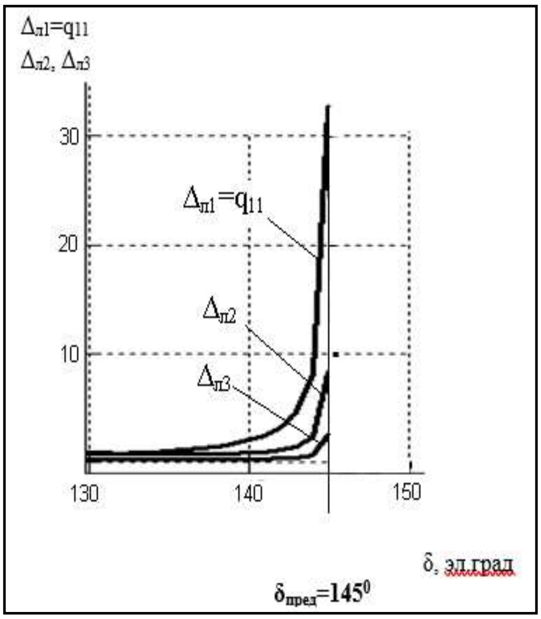

Рис. 2.

Рис. 1. Характер изменения главных миноров матрицы функции Ляпунова в квадратичной форме при наличии в синхронном генераторе АРВ-п

В данном случае предел устойчивости ЭЭС наступает при $\delta_{пред}=133^0$, причем, к пределу первым устремляется q_{11}.

Рассмотрим случай наличия на синхронном генераторе АРВ сильного действия, реагирующего на отклонения, первую производную угла ($\Delta\delta$) и напряжения генератора ($\Delta u_г$). Учитываются постоянные времени измерительного и усилительного элементов при условии $T_и=T_у$.

Рис. 2. Характер изменения главных миноров матрицы функции Ляпунова в квадратичной форме при наличии в синхронном генераторе АРВ-с

Анализ характера изменений главных миноров Q показывает, что они совпадают: при приближении режима к предельному значения Δ_j, где j = 1-6, возрастают неограниченно [6]. На рис.2 в качестве примера приведены характеристики $\Delta_j = q_{11}$, Δ_2 и Δ_3, которые подтверждают сказанное. При этом первым к пределу устремляется $\Delta_1 = q_{11}$.

Развитие матричных методов исследования динамических систем открывает широкие возможности исследования и управления режимами сложных электрических систем, повышает надежность алгоритмов и упрощает их программную реализацию [7]

Литература

1. Кучеров Ю.Н., Волков Э.П. Стратегия направления и приорите-ты развития электроэнергетики. М.: Промышленная энергетика, 2002. №2. С. 2-12.
2. Аллаев К.Р., Мирзабаев А.М. Малые колебания электрических систем. Т.: «Fan va texnologiya», 2011. 316 с.
3. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высшая школа,1984. 536 с.
4. Мисриханов М.Ш. Инвариантное управление многомерными системами. М.: Наука, 2007. 284 с.
5. Параев Ю.И., Перепелкин Е.А. Линейные матричные уравнения в задачах анализа многосвязных динамических систем. Барнаул: Из-во АлтГТУ, 2000. 117 с.
6. Махмудов Т.Ф. Матричные способы синтеза оптимальных систем возбуждения синхронных генераторов. // Электротехнические системы и комплексы: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2012, № 20. С. 204-213.
7. Аллаев К.Р, Махмудов Т.Ф. Применение функции Ляпунова в квадратичной форме для исследования статической устойчивости регулируемой электрической системы. // Проблемы энерго- и ресурсосбережения: Ташкент, 2012, № 3-4. С. 10-19.