ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА им. С. М. КИРОВА

Том 202 1973

К ВОПРОСУ О ФОРМЕ ЗАПИСИ ИСХОДНЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПО МЕТОДУ ФУНКЦИЙ ЛЯПУНОВА

Р. И. БОРИСОВ, И. А. БЕЗЛЕР, Н. Е. ЧЕРНЫЙ

(Представлена кафедрой электрических систем и сетей)

Использование метода функций Ляпунова к расчетам динамической устойчивости электроэнергетических систем затрудняется их построением и установлением необходимых и достаточных критериев устойчивости. При этом чем меньше параметров режима и элементов системы учитывает метод построения функции, тем слабее оказываются достаточные условия устойчивости. Параметрами считаются некоторые переменные режимов и переменные различных элементов схем, определенные сочетания которых позволяют произвести описание электрического состояния всей системы для интересующих моментов времени.

Возникает целый ряд трудностей при создании математической модели электроэнергетической системы, пригодной для целей исследования динамической устойчивости по методу Ляпунова. Так, в [4] дана общая характеристика алгоритма расчета устойчивости многомашинных систем по критериям Ляпунова, в котором математическое описание системы соответствует ее позиционной идеализации. Такое представление системы приемлемо в нормальном и установившемся послеаварийном режиме, в переходном процессе же электрическая система должна по возможности описываться как диссипативная [7]. Последствия этого ограничения, накладываемые на учет практически важных переменных параметров режима и системы, сужая достаточные условия устойчивости, не позволяют судить о соответствии полученных по данной методике результатов переходного процесса, протекающего в реальных условиях. Решение этой задачи возможно, если производить построение функции Ляпунова и получение достаточных условий устойчивости согласно методу Зубова [5]. Однако, как явствует из ряда работ, ограничения, накладываемые возможностью ЦВМ, не позволяют данному методу стать практически приемлемым [6].

Однако поставленная задача может быть решена, если произвести следующие обоснования.

Определение значений критериальных постоянных в установившемся послеаварийном режиме

Как отмечалось выше, согласно [7], в нормальном и установившемся послеаварийном режиме математическое описание большой электроэнергетической системы может быть упрощено и соответствовать ее позиционной идеализации. При этом для определения координат седловой точки и критериальной постоянной используется метод n-мерного куба [4].

Приближенно значение критериальной постоянной определяется по соотношению:

$$l \approx \min \omega_i(\varepsilon_i) = \min(2A_i - B_i\varepsilon_i), \tag{1}$$

где

$$\varepsilon_i = 2 \operatorname{arctg} \frac{A_i}{B_i}; \tag{2}$$

$$\left.\begin{aligned} A_i &= \left| \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} E_i E_j y_{ij} \cos\alpha_{ij} \cos\delta_{*ij} \right| \\ B_i &= \left| \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} E_i E_j y_{ij} \cos\alpha_{ij} \cos\delta_{*ij} \right| \end{aligned}\right\}. \tag{3}$$

Для нахождения точных координат седловой точки используется метод скорейшего спуска.

Подсчет функции Ляпунова в аварийном состоянии системы осуществляется по формуле:

$$\begin{gathered} V_0 = \frac{1}{2} \sum_{i<j}^{n} J_i s_{i0}^2 - \frac{1}{2} \frac{\left(\sum\limits_{i=1}^{n} J_i s_{i0} \right)^2}{\sum\limits_{i=1}^{n} J_i} + \sum_{i<j}^{n} E_i E_j y_{ij} \cos\alpha_{ij} \times \\ \times [\cos\delta_{*ij}(1 - \cos\Delta\delta_{ij0}) - \sin\delta_{*ij}(\Delta\delta_{ij0} - \sin\Delta\delta_{ij0})]. \end{gathered} \tag{4}$$

Суждение о динамической устойчивости получают либо по критерию Ляпунова, либо по критерию неустойчивости.

$$V_0 \leqslant l; \tag{5}$$

$$\max|\delta_{ij}| > \varepsilon. \tag{6}$$

Записанная функция Ляпунова (4) дает условия устойчивости, близкие к достаточным в позиционной электрической системе. Однако, как уже неоднократно отмечалось, такое математическое представление реальной системы в аварийных режимах не позволяет описать электромеханический переходный процесс. Целесообразным оказывается описание электрического состояния системы с помощью уравнений сетевых мощностей, позволяющих учитывать особенности каждого элемента схемы [9].

Запись уравнений состояний по генераторным узлам и вычисление функции Ляпунова по известным параметрам

Поскольку сетевые мощности в системе (рис. 1), подтекающие к каждому узлу, зависят от напряжения этих узлов и электрических углов между векторами напряжений, то уравнение состояний по узлам совместно с уравнениями баланса активных и реактивных мощностей и будут определять параметры режима этих состояний.

$$\left.\begin{aligned} \sum_{i=1}^{n} P_i(U_i, U_j, \delta_{ij}) &= 0 \\ \sum_{i=1}^{n} Q_i(U_i, U_j, \delta_{ij}) &= 0 \end{aligned}\right\}. \tag{7}$$

Для схемы, изображенной на рис. 1, электромеханический переходный процесс описывается системой из n дифференциальных уравнений вида:

$$J_i \frac{dx_i}{dt} = F_i, \tag{8}$$

где

$$F_i = \Phi_i (E_i, U_i, \theta_i, z_i, t), \tag{9}$$

где E_i, U_i — соответственно эдс и напряжения на выводах i-го генератора;

$\theta_i = \delta_E - \delta_U$ — электрический угол между векторами соответствующих переменных;

z_i — сопротивление i-го генератора.

Решая (8) методами численного интегрирования, на каждом расчетном интервале значения переменных параметров режима и элементов системы принимаются неизменными. На основании этого на величине данного интервала схема сложной системы, приведенная на рис. 1, может быть приведена к n простейшим схемам «генератор шины неизменного напряжения и частоты» с параметрами конца предшествующего интервала (рис. 2).

Значения мощностей, отдаваемых i-м генератором в систему, согласно (9) определяются как

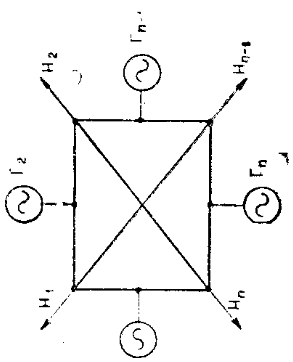

Рис. 1

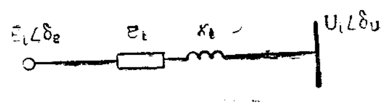

Рис. 2

$$P_i = \frac{E_i U_i}{z_i} \sin \theta_i, \qquad Q_i = \frac{E_i U_i}{z_i} \cos \theta_i. \tag{10}$$

Приращение функции Ляпунова можно подсчитать по выражению функции, построенной в [2] для простейшей системы

$$V_i = \frac{1}{2} J_i s^2 - \frac{E_i U_i}{z_i} \sin (\theta_{*i0} - \alpha_i) (\Delta\theta_i - \sin \Delta\theta_i) + \frac{E_i U_i}{z_i} (\theta_{*i0} - \alpha_i) (1 - \cos \Delta\theta_i), \tag{11}$$

где $s = \frac{d\Delta\theta_i}{dt}$ — скольжение i-й машины относительно вращающегося вектора напряжения.

Значение функции Ляпунова для i-го генератора при выходе на послеаварийную характеристику определится, как

$$V_{i0} = \sum_{\kappa=1}^{m} V_{i\kappa}. \tag{12}$$

Значение функции Ляпунова на κ-м интервале для всей системы при ее движении относительно синхронно вращающейся оси определится как сумма частных значений

$$V'_\kappa = \sum_{i=1}^{n} V_{i\kappa}. \tag{13}$$

Очевидно, что в общем случае должна рассматриваться устойчивость системы не по отношению к синхронной оси, а в их взаимном движении. Это обстоятельство легко учесть, если из выражения вычесть дополнительный член

$$\frac{\left(\sum_{i=1}^{n} J_i s_i\right)^2}{2\sum_{i=1}^{n} J_i},$$

характеризующий кинетическую энергию средневзвешенного движения системы [8]. Здесь

$$s_i = \frac{d\Delta\delta_i}{dt} -$$

скольжение i-й машины относительно синхронно вращающейся оси.

Таким образом, окончательное значение функции Ляпунова на κ-м интервале определится как

$$V_\kappa = V_\kappa' - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} J_i s_i\right)^2}{2\sum_{i=1}^{n} J_i}. \tag{14}$$

Значение при выходе на послеаварийную характеристику равно сумме значений m конечных интервалов времени

$$V_0 = \sum_{\kappa=1}^{m} V_\kappa. \tag{15}$$

Нетрудно заметить, что для одной и той же электрической системы, при одинаковом ее математическом описании, выражение (15) тождественно равно (4). Поэтому факт устойчивости рассматриваемой системы можно установить по критериям Ляпунова (5) или неустойчивости (6), вычисленных в установившемся послеаварийном режиме.

Факт устойчивости отдельных генераторных станций устанавливается аналогично по соответствующим критериям.

Выводы

1. Сочетание нашедших применение в практике методов численного интегрирования и качественного анализа существенно расширяет область решаемых задач динамической устойчивости для сложных электроэнергетических систем.

2. Рассматриваемые уравнения сетевых мощностей позволяют учитывать особенности каждого интересуемого режима и элемента схемы.

3. Определяемые с помощью данных уравнений значения функций Ляпунова на протяжении реально рассматриваемого времени переходного процесса учитывают изменения в схеме режимного и оперативного характера.

4. Оценку устойчивости можно произвести как для отдельных генераторов или частей системы, так и для системы в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Т. Путилова. Анализ устойчивости сложных электроэнергетических систем по критериям Ляпунова. — Труды второго семинара симпозиума по применению метода функций Ляпунова в энергетике. Новосибирск, 1970.

2. Т. Б. Заславская, М. А. Тагиров. Устойчивость простых переходов. —

Совместная работа дальних электропередач с промежуточными системами. Новосибирск, 1966.

3. А. А. Янко-Триницкий. Новый метод анализа работы синхронных двигателей при резко переменных нагрузках. М., Госэнергоиздат, 1958.

4. А. Т. Путилова. Общая характеристика алгоритма расчета устойчивости многомашинных систем по критериям Ляпунова. — Труды Сибирского научно-исследовательского института энергетики, вып. 17, М., «Энергия», 1970.

5. В. И. Зубов. Математические методы исследования систем автоматического регулирования Л., «Судпромгиз», 1959.

6. Y. N. Yu and K. Vongsuriga, Power System Stability Study by Lyapunov Functions and Zubov's Method,— «IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems», 1967, Vol., 86, N 2, pp. 1480—1496.

7. В. А. Веников. Переходные элетромеханические процессы в электрических системах. «Высшая школа», 1970.

8. А. А. Горев. Избранные труды по вопросам устойчивости электрических систем. Госэнергоиздат, 1960.

9. Управление режимами нормальной работы и выбор основных параметров устройств дальних электропередач переменного тока с промежуточными энергосистемами. Отчет по научно-исследовательской работе, Томск, 1971.