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

Том 295 1976

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФУНКЦИИ ЛЯПУНОВА В КАЧЕСТВЕ КРИТЕРИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Р. И. БОРИСОВ, Н. Е. ЧЕРНЫЙ

(Представлена научным семинаром кафедры электрических систем и сетей)

Исследования динамической устойчивости сложных электроэнергетических систем (ЭЭС) связаны с проведением массовых расчетов при различных начальных условиях и видах возмущений. Это обстоятельство должно учитываться при выборе метода анализа, а также при разработке алгоритмов и эксплуатационных программ.

Один из возможных подходов к решению этой задачи основан на применении прямого метода Ляпунова. При исследованиях электрических систем (ЭС) для построения функции Ляпунова широко используется энергетический подход, при котором функция определяется как сумма кинетической (К) и потенциальной (П) энергий системы в ее возмущенном движении [1].

При таком подходе, позволяя оценивать устойчивость ЭС при воздействии на нее различных возмущений, метод функций Ляпунова может быть использован для решения других вопросов, связанных с исследованием режимов работы ЭС и управления ими.

Рассмотрим ЭС, система дифференциальных уравнений возмущенного движения для которой в позиционной идеализации имеет вид [2]

$$\left.\begin{aligned} &\frac{d\Delta\delta_i}{dt}=s_i; \\ &J_i\frac{ds_i}{dt}=F(\delta); \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где s_i — скольжение ротора синхронного генератора;

J_i — постоянная инерции синхронного генератора;

δ — вектор-столбец фазовых координат $\delta_1, \delta_2, \ldots, \delta_n$;

$F(\delta)$ — вектор-функция.

Для таких систем известна функция Ляпунова [2], которая записывается для случая, когда отсутствуют шины бесконечной мощности, в следующем виде:

$$V=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}J_i s_i^2-\frac{\left(\sum\limits_{i=1}^{n}J_i s_i\right)^2}{2\sum\limits_{i=1}^{n}J_i}+$$

$$+\sum_{i<j} E_i E_j y_{ij} \cos \alpha_{ij} [\cos \delta_{*ij}(1-\cos\Delta\delta_{ij}) - \sin \delta_{*ij}(\Delta\delta_{ij} - \sin\Delta\delta_{ij})]. \qquad (2)$$

Факт устойчивости ЭС в ее динамическом переходе устанавливается по критерию Ляпунова

$$V_0 \leqslant V_{kp}, \qquad (3)$$

где V_0 — начальное возмущение послеаварийного режима;

V_{kp} — критериальное значение функции Ляпунова в установившемся, послеаварийном режиме.

Начальное возмущение послеаварийного режима определяется численным интегрированием дифференциальных уравнений движения роторов генераторов и нахождением значения функции Ляпунова по полученным независимым переменным — $\delta_1, \delta_2, \ldots, \delta_n$.

На каждом шаге численного интегрирования решением системы алгебраических уравнений рассчитывается стационарный режим, для которого должно выполняться условие

$$S(X) = 0, \qquad (4)$$

где X — вектор параметров режима ЭС — $x_1, x_2, \ldots, x_m$.

Поскольку сетевые мощности в системе, подтекающие к каждому узлу, зависят от напряжений этих узлов и электрических углов между ними, то уравнения состояний по узлам совместно с уравнениями баланса активной и реактивной мощностей и будут определять параметры режима [3]:

$$\left.\begin{aligned} &\sum_{i \neq j}^{n} P_i(|U_i|, |U_j|, \delta_{ij}) = 0; \\ &\sum_{i \neq j}^{n} Q_i(|U_i|, |U_j|, \delta_{ij}) = 0; \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

где $|U_i|$, $|U_j|$ — модули напряжений выделенного и смежных узлов;

δ_{ij} — электрический угол между ними.

В [4] предлагается систему дифференциальных уравнений вида (1) приводить к нормальной форме для каждой в отдельности эквивалентной станции и связанного с ней участка сети до точки примыкания к системе. В результате получаем новую систему дифференциальных уравнений возмущенного движения вида:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{d\,\Delta\theta_i}{dt} = s_i; \\ &J_i \frac{ds_i}{dt} = F_i(E_i, U_i, \theta_i, t); \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

где U_i — напряжение в узле примыкания эквивалентного генератора к сети;

$\theta_i = \delta_i - \delta_{ui}$ — электрический угол между векторами э. д. с. и напряжения.

Делается допущение, что на протяжении каждого малого, расчетного интервала времени вектор напряжения в точке ветвей станций к остальной сети остается неизменным и не зависящим от изменения режима электростанций.

Определим значение вектора напряжения в начале К-го интервала для i-го узла примыкания:

$$\dot{U}_i^{(\kappa)} = \frac{\dot{E}_i \dot{Y}_{ii} + \sum_{j=1\ i\neq j}^{n} \dot{E}_j \dot{Y}_{ij}}{\dot{Y}_{ii} + \sum_{j=1\ i\neq j}^{n} \dot{Y}_{ij}}, \tag{7}$$

где $\dot{Y}_{ii}$ — собственная проводимость генераторной ветви;

$\dot{Y}_{ij}$ — взаимная проводимость между узлом примыкания и э. д. с. остальных генераторов.

В силу неизменности расчетных э. д. с. в принятой математической модели ЭС значение вектора напряжения можно записать как функцию фазовых координат δ для любого момента времени:

$$\dot{U}_i = F_1 \cdot (\delta_1, \delta_2, \ldots, \delta_i, \ldots, \delta_n). \tag{8}$$

Таким образом, в правой части системы (6) записаны вектор-функции, соответствующие вектор-функциям в правой части системы (1):

$$F(\delta) \equiv F_1(\delta). \tag{9}$$

На основании сделанных рассуждений на каждом расчетном интервале времени переходного процесса схема замещения сложной ЭС может быть условно приведена к «n» простейшим схемам — «генератор — шины неизменного напряжения» с параметрами конца предшествующего интервала. Для каждой из выделенных схем можно построить функцию Ляпунова по [5]:

$$V_i^{(k)} = \frac{1}{2} J_i s_1^2 - \frac{E_i U_i}{x_i} [\sin\theta_{*i0}(\Delta\theta_i - \sin\Delta\theta_i) + \\ + \cos\theta_{*i0}(1 - \cos\Delta\theta_i)], \tag{10}$$

где Θ_{*i0} — электрический угол между векторами э.д.с. и напряжения на выводах i-го генератора в установившемся, послеаварийном режиме;

$\Delta\theta_i = \theta_i^{(k)}\theta_{*i0}$ — отклонение угла θ к концу расчетного интервала.

Функцию Ляпунова для всей системы можно записать как сумму функций отдельных генераторов:

$$V_\Sigma^{(k)} = \sum_{i=1}^{n} V_i^{(k)}. \tag{11}$$

В случае, когда в ЭС отсутствуют шины бесконечной мощности, из выражения (11) необходимо вычесть член, учитывающий кинетическую энергию средневзвешенного движения:

$$V^{(k)} = V_\Sigma^{(k)} - K_{\text{ср}}^{(k)}. \tag{12}$$

Предложенный алгоритм расчета начальных возмущений реализован в виде автономного блока, который состыкован с программой расчета динамической устойчивости на ЭВМ М-220 СЭИ СО АН СССР. Результаты расчета контрольного примера для ЭС, включающей 5 синхронных генераторов, приведены на рис. 1; кривые изменения относительных углов приведены на рис. 2. Время счета контрольного примера составляет 1,5 *мин.* С увеличением количества активных узлов возрастает расчетное время задачи на ЭВМ и, что не менее важно, трудозатраты при анализе результатов. Так, например, время расчета электромеханического процесса в ЭС, состоящей из 44 генераторов, составляет 40÷50 *мин.* на 1 *сек.* процесса. Кроме того, зачастую иссле-

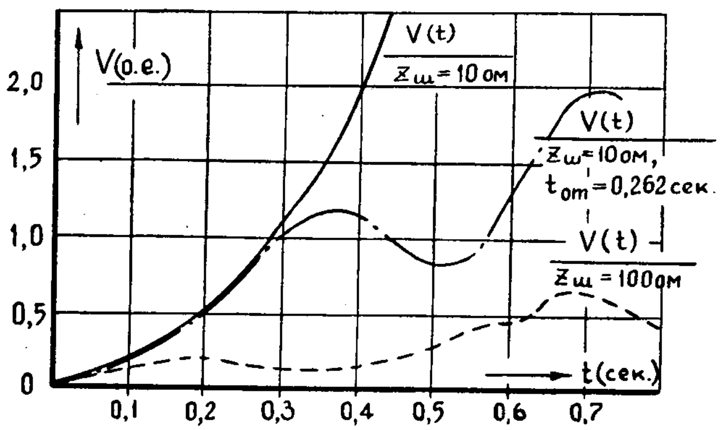

Рис. 1. Кривые изменения функции Ляпунова во времени при различных видах возмущения.

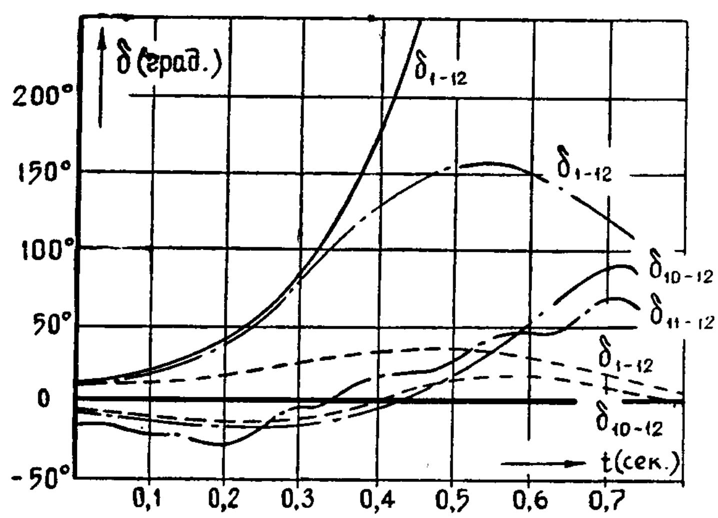

Рис. 2. Кривые изменения относительных углов роторов характерных генераторов во времени.

дователя интересует не характер переходного процесса во всех элементах, а факт устойчивости или неустойчивости ЭС при воздействии конкретного возмущения. Естественны в связи с этим попытки, направленные на упрощение математических моделей сложных ЭС.

В [6, 7] рассматриваются некоторые возможности применения функции Ляпунова при моделировании ЭС. Показано, что форма гиперповерхности, представляющей функцию Ляпунова, определяет характеристики соответствующей системы.

Покажем возможности применения функции (12) для эквивалентирования отдельных подсистем. Для этого рассмотрим частный случай, когда эквивалентируемая подсистема имеет один узел присоединения к непреобразумой подсистеме, рис. 3. В практике проектирования и эксплуатации подобная задача имеет место как в случаях подключения новых ЭЭС, так и в случаях работы удаленной электростанции на приемную систему.

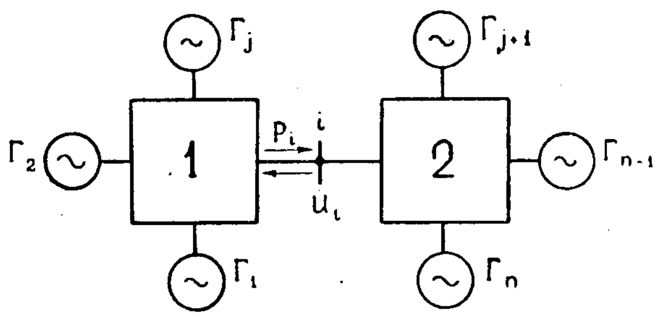

Рис. 3. Структурная схема исследуемой электрической системы: 1 — непреобразуемая подсистема, 2 — преобразуемая подсистема.

Аналогичная задача решалась в [8], где в качестве обобщенного критерия эквивалентирования принималась инвариантность кинетической энергии движения роторов в исходной и эквивалентной системах. Функция (12) позволяет учитывать инвариантность полной энергии всей системы. При этом критерий эквивалентирования может быть сформулирован следующим образом:

$$V^{(k)}=V^{(k)}_{э}, \tag{13}$$

Помимо (13), должно соблюдаться условие

$$V^{(k)}_{i}=V^{(k)}_{iэ}, \tag{14}$$

где $V^{(k)}_{i}$ — значение функции для исходной подсистемы;

$V^{(k)}_{iэ}$ — значение функции для эквивалентной подсистемы.

В этом случае значения начальных возмущений послеаварийного режима остаются одинаковыми для исходной и эквивалентной моделей ЭС.

В дополнение к (14) должно выполняться условие инвариантности активной мощности:

$$\sum_{i=1}^{n} P_i=P_э. \tag{15}$$

Непосредственно процесс эквивалентирования выбранной подсистемы разбивается на 3 основные этапа:

1. Рассчитывается стационарный режим полной ЭС. Известными методами эквивалентирования определяются величины $\dot{E}_{iэ}$, $\dot{Y}_{iэ}$, $J_{iэ}$, $S_{iэ}$ (преобразование схемы, правило моментов, суммирование).

2. Производится расчет переходного процесса в эквивалентной ЭС и оценивается погрешность эквивалентирования — $\Delta V^{(k)}_{iэ}$.

3. По величине $\Delta V^{(k)}_{iэ}$ на расчетном интервале корректируются значения $E^{(k)}_{iэ}$ (по величине потенциальной энергии) и $J^{(k)}_{iэ}$ (по величине ки-

нетической энергии), скорректированные значения принимаются в качестве расчетных на следующем интервале.

Предлагаемая методика эквивалентирования может легко реализоваться на ЭВМ, но требует знания значений функции $V_i(t)$ для искомой модели ЭС. Ее конкретная реализация возможна в сочетании с методом контрольных возмущений [9]. Использование этого метода заключается в задании вида возмущения в узле присоединения, затем производится расчет переходного процесса в выделенной для эквивалентирования подсистеме. Представляется допустимым принимать в качестве контрольного возмущения область возможных значенией напряжения в узле присоединения:

$$0 \leqslant U_i \leqslant U_{i\max} \tag{16}$$

При различных значениях контрольного возмущения в сочетании с вероятными перетоками по ветви присоединения активной мощности строятся характеристики функции (14) во времени, на основании которых может быть организован архив эталонных характеристик в памяти ЭВМ. В ходе расчета динамической устойчивости ЭС по второму этапу эквивалентирования производится выборка соответствующих характеристик.

Распространение приводимой методики эквивалентирования на общий случай, когда упрощаемая подсистема имеет несколько узлов присоединения, затруднено в силу вероятностной зависимости параметров режима по каждому из узлов. Для выявления этих зависимостей следовало бы организовать сбор и формирование большого количества статистического материала, который в настоящее время отсутствует.

Выводы

1. Использование уравнений сетевых мощностей в сочетании с особенностями методов численного интегрирования дифференциальных уравнений позволяет определять значение функции Ляпунова для ЭС, как суммы функций отдельных синхронных генераторов.

2. Предлагаемая форма записи функции Ляпунова (12) позволяет использовать ее в качестве критерия эквивалентности математических моделей ЭС.

3. Рассмотренная методика упрощения моделей ЭС легко реализуется для частного случая, имеющего место в сложных ЭС. Реализация ее для общего случая затруднена отсутствием статистического материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Т. Путилова, М. А. Тагиров. Итоги науки и техники. Электрические станции, сети и системы. Критерии устойчивости электроэнергетических систем. М., 1971.

2. А. Т. Путилова. Анализ устойчивости сложных электроэнергетических систем по критериям Ляпунова. Труды второго семинара-симпозиума по применению метода функций Ляпунова в энергетике. Новосибирск, «Наука», 1970.

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

4. Л. В. Цукерник. Приведение к нормальной форме уравнений возмущенного движения сложных энергосистем при расчетах устойчивости и электромеханичес-

ких переходных процессов. Вопросы применения вычислительной техники в энергетических системах. Изд-во АН СССР, 1962.

5. Т. Б. Заславская, М. А. Тагиров. Устойчивость простых переходов. Совместная работа дальних электропередач с промежуточными системами. Труды СибНИИЭ, вып. 4, Новосибирск, 1966.

6. A. K. De Sarkar, N. Dharma Rao. Dynamic-system simplification and on application to power-system stability studies. Proc. Instn. Electr. Engrs., 1972, 119, № 7.

7. D. M. Nocdhal, J. L. Melsa. Modelling with Liapunov functions. JACC preprints, 1967.

8. Л. А. Жуков. Статические регулируемые источники реактивной мощности и эффективность их применения в электрических системах. Автореферат докторской диссертации. М., МЭИ, 1971.

9. Н. Н. Щедрин. Упрощение электрических систем при моделировании. М., «Энергия», 1966.

10. Н. И. Воропай, Г. Я. Леманович. Программа расчета синхронной динамической устойчивости многомашинной электроэнергетической системы (для ЭЦВМ БЭСМ-4). Сб. типовых программ для ЭЦВМ БЭСМ-2 и БЭСМ-4. Иркутск, 1968.