УДК 621.311.016.351.001.24

С.М. РАТМАНОВ, инженер (ВПИ)

ЛИНЕЙНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УТЯЖЕЛЕНИЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Одно из условий надежного снабжения потребителей электроэнергией высокого качества — обеспечение статической устойчивости режима электроэнергетических систем, которые в настоящее время представляют собой сложные системы кибернетического типа, включающие множество элементов, оснащенных аппаратурой для автоматического управления. Исследование статической устойчивости в таких системах практически невозможно производить без использования эквивалентирования.

Предлагается [1] разделение сложной электроэнергетической системы на эквивалентные подсистемы по условию инвариантности показателя статической устойчивости и приводится методика построения таких подсистем.

В проектной и эксплуатационной практике интерес представляет не столько оценка условий устойчивости отдельного исследуемого режима электроэнергетической системы, сколько нахождения удаленности этого режима от предельного, т.е. определение запаса статической устойчивости. Для расчета предельных по устойчивости режимов применяется метод последовательного изменения (утяжеления) исследуемого режима с проверкой на каждом шаге критериев устойчивости. Траектория утяжеления определяется совокупностью изменяемых режимных параметров и характером их изменения, например, увеличение нагрузки и генерации в заданных узлах системы, перераспределение мощности между генераторными узлами, снижение частоты [2].

В данной статье рассматривается построение линейной математической модели утяжеления режима эквивалентной подсистемы и ее использование для нахождения предельных по статической устойчивости режимных параметров [1].

Из литературы [3,4] известны различные способы безитерационного расчета утяжеленных режимов. Данный подход основан на использовании частотно-фазового метода.

Для установившегося режима гармонических колебаний с частотой γ уравнение эквивалентной подсистемы представится в виде

$$\underline{W}_p\,(j\gamma)\,\underline{U}_p = \underline{I}_в, \qquad (1)$$

где $\underline{W}_p\,(j\gamma)$ — матрица эквивалентной подсистемы, по которой устанавливается ее математическая модель; $\underline{U}_p$ — вектор эквивалентной подсистемы, определяющий изменение режимных параметров эквивалентной подсистемы при малых возмущениях; $\underline{I}_в$ — вектор возмущений, координаты которого определяются отклонениями прямой и обратной последовательности по задающим токам.

Вектор эквивалентной подсистемы имеет координаты по отклонениям прямой и обратной последовательности напряжения узлов эквивалентной подсистемы $\Delta\dot{U}_{A_1(i)}$, $\Delta\dot{U}_{A_2(i)}$ (для базисного узла α [5] — координаты по отклонениям его напряжения $\Delta\dot{U}_{A_1(\alpha)}$ и частоты $\Delta\dot{\omega}$), а также координаты по параметрам системы автоматического регулирования частоты и активной мощности (АРЧМ). Построение матрицы эквивалентной подсистемы соответствует координатам этого вектора [1,5].

Линейная математическая модель утяжеления режима эквивалентной подсистемы $W_p(j0)$ формируется по математической модели эквивалентной подсистемы для исследования апериодической устойчивости (режим с частотой гармонических колебаний $\gamma = 0$) с добавлением эквивалента, отражающего вышестоящие по иерархии расчета подсистемы (рис. 1).

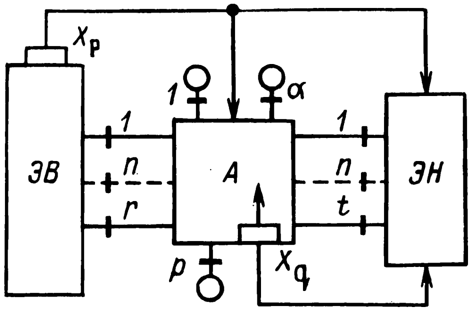

Рис. 1. Схема построения линейной математической модели утяжеления режима эквивалентной подсистемы: 1, ..., α, ..., р — шины примыкания генераторных и нагрузочных узлов собственно подсистемы А; r, t — число узлов примыкания эквивалентов, отражающих соответственно вышестоящие (ЭВМ) и нижестоящие (ЭН) по иерархии расчета подсистемы; X_p, X_q — векторы внешнего и внутреннего регулирования по контуру регулирования.

В частотно-фазовой методике используется функциональное представление элементов электроэнергетической системы их амплитудно-фазовыми частотными характеристиками, устанавливаемыми по векторным отклонениям режимных параметров. В связи с этим эквиваленты преобразуемых участков системы моделируются результирующими амплитудно-фазовыми частотными характеристиками относительно узлов примыкания. Установлена методика, позволяющая определить данные результирующие частотные характеристики по информации об установившемся режиме гармонических колебаний преобразуемой части электроэнергетической системы с учетом изменения и регулирования частоты.

В записи через блоки линейную математическую модель утяжеления режима эквивалентной подсистемы можно представить матрицей

$$\underline{W}_p(j0) = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} \overbrace{\qquad\qquad}^{2(p+r+t)} & \overbrace{\qquad\qquad}^{s} \end{array} \\ \left(\begin{array}{c|c} \underline{W}_c(j0) & \underline{W}_{cp}(j0) \\ \hline \underline{W}_{pc}(j0) & \underline{W}_{pp}(j0) \end{array}\right) \end{array} \begin{array}{l} \}\,2(p+r+t) \\ \}\,s \end{array}$$

где р — число учитываемых генераторных и нагрузочных узлов собственно в подсистеме А; (r + t) — число узлов примыкания эквивалентов; s — количество координат регулирования системы АРЧМ.

Изменение параметров режима на шинах узлов эквивалентной подсистемы при малых возмущениях определяется координатами вектора U_p. В связи с этим в работе для моделирования заданной траектории утяжеления используется фиксация ряда координат вектора $\underline{U}_p$. При утяжелении режима все узлы эквивалентной подсистемы разделяются на узлы с возмущениями и узлы без возмущений. Соответственно координаты вектора $\underline{U}_p$ образуют два подвектора: $\underline{U}_{p1}$ (основные координаты) и $\underline{U}_{p2}$ (дополнительные координаты)

$$\underline{U}_p = \begin{pmatrix} \underline{U}_{p1} \\ \underline{U}_{p2} \end{pmatrix} \tag{2}$$

В случае перераспределения активной нагрузки между "передающим" узлом i и "балансирующим" узлом j имеем

$$\left.\begin{aligned} &\Delta \dot{U}_{A_1(i)} = \Delta \hat{U}_{A_2(i)} = jU_i e^{j\beta_i} \Delta\beta_i ; \\ &\Delta \dot{U}_{A_1(j)} = \Delta \dot{U}_{A_2(j)} = 0, \end{aligned}\right\}$$

где $\Delta\beta_i$ — малое приращение фазы вектора $\dot{U}_i$.

Для узлов, в которых снижается напряжение, запишем

$$\Delta \dot{U}_{A_1(i)} = \Delta\hat{U}_{A_2(i)} = e^{j\beta_i} \Delta U_i ,$$

где ΔU_i — малое изменение модуля вектора $\dot{U}_i$.

Для узлов, в которых снижается напряжение и изменяется активная нагрузка, можно записать

$$\Delta \dot{U}_{A_1(i)} = \Delta \hat{U}_{A_2(i)} = e^{j\beta_i} [-\Delta U_i + j(+\Delta\beta_i)] .$$

Утяжеление режима эквивалентной подсистемы по частоте можно моделировать заданием координаты

$$\Delta \dot{\omega} = a_\omega (a_\omega \lessgtr 0) .$$

Аналогичным образом (по изменению величины, фазы и частоты напряжений на шинах узлов эквивалентной подсистемы) возможно моделировать и другие траектории утяжеления режима.

По составляющим вектора (2) уравнение (1) перепишется в виде

$$\left.\begin{aligned} &\underline{W}_{p11}(j0)\, \underline{U}_{p1} + \underline{W}_{p12}(j0)\, \underline{U}_{p2} = \underline{I}_{B1} ; \\ &\underline{W}_{p21}(j0)\, \underline{U}_{p1} + \underline{W}_{p22}(j0)\, \underline{U}_{p2} = 0; \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

где I_{B1} — подвектор вектора I_B, соответствующий узлам с возмущениями.

По решению системы линейных уравнений (3) возможно получить значения дополнительных координат U_{p2} по заданным значениям U_{p1}. В результате на каждом шаге утяжеления режима определяется новый вектор U_p, что позволяет рассчитать комплексные значения напряжений в узлах и частоту, а по ним и другие режимные параметры эквивалентной подсистемы.

Отклонения напряжения и частоты на шаге утяжеления режима

$$\Delta \dot{U}_i = 2\Delta \dot{U}_{A_1(i)} ,\ \Delta\omega = 2\mathrm{Re}\,(\Delta\dot{\omega}) ,\ i = 1,\ldots, p + r + t,$$

и их значения после шага утяжеления равен

$$\dot{U}_i = \dot{U}_{io} + \Delta \dot{U}_i;$$

$$\omega = \omega_o + \Delta\omega,$$

где $\dot{U}_{io}$, ω_o — значения напряжения и частоты до шага утяжеления режима эквивалентной подсистемы.

Матрица узловых токов

$$\underline{I} = \underline{Y}\underline{U},$$

где

$$\underline{I} = (\dot{\underline{I}}_1, \dot{I}_2, \ldots, \dot{I}_{p+r+t})^T$$

$$\underline{U} = (\dot{U}_1, \dot{U}_2, \ldots, \dot{U}_{p+r+t})^T,$$

Y — матрица узловых собственных и взаимных проводимостей.

Мощности узлов эквивалентной подсистемы после шага утяжеления равны

$$\dot{S}_i = P_i + jQ_i = \dot{U}_i \hat{I}_i, \; i = 1, \ldots, p + r + t.$$

Располагая информацией о режимных параметрах после шага утяжеления, возможно произвести оценку условий статической устойчивости нового установившегося режима эквивалентной подсистемы [1]. После выполнения ряда утяжелений по заданной траектории выявляется предельный по устойчивости режим работы эквивалентной подсистемы.

Для повышения скорости и точности определения параметров предельных режимов возможно комбинировать использование линейной математической модели утяжеления с традиционными расчетами установившегося режима, в частности, путем перехода на линейную модель при приближении к пределу, учитывая ухудшенную сходимость итерационных методов в этой области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л е д я н к и н Д.П., Р а т м а н о в С.М. Разделение сложной электроэнергетической системы на эквивалентные подсистемы для исследования статической устойчивости. — Изв. вузов СССР. Энергетика, 1980, № 11, с. 8—13. 2. П о р т н о й М.Г., Р а б и н о в и ч Р.С. Управление энергосистемами для обеспечения устойчивости. — М.: Энергия, 1978. — 352 с. 3. А н д р е ю к В.А., М а р ч е н к о Е.А. Математический алгоритм расчета надежности работы энергообъединения по условиям устойчивости при аварийных небалансах мощности. — В сб.: Передача энергии постоянным и переменным током. Труды НИИПТ. Л.: Энергия, 1977, вып. 24—25, с. 11—19. 4. К о щ е е в Л.А., С а д о в с к и й Ю.Д. Алгоритм дозировки управляющих воздействий противоаварийной автоматики сложных энергосистем. — Электрические станции, 1981, № 9, с. 53—58. 5. Л е д я н к и н Д.П., Р а т м а н о в С.М. Уточнение методики построения показателя апериодической устойчивости электрической системы. — Изв. вузов СССР. Энергетика, 1981, № 11, с. 6—11.