

ПОСТРОЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ ЭНЕРГОСИСТЕМ ДЛЯ РАСЧЕТОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ

В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, Е.А. Крюков

Рассмотрены вопросы эквивалентирования энергосистем, имеющих однофазные и несимметричные нагрузки. Показано, что использование фазных координат для записи уравнений установившегося режима обладает способностью точного воспроизведения параметров режима, возможностью отображения частотных свойств, точным воспроизведением потерь мощности в сети и возможностью оперативной корректировки эквивалентов по данным телеизмерений.

Применяемые в настоящее время системы оперативного и противоаварийного управления предназначены для реализации комплексов управляющих воздействий в ограниченных районах энергообъединений. При формировании модели района управления необходимо учитывать неконтролируемую часть энергообъединений, так как она может оказывать существенное влияние на потокораспределение. Следовательно, для правильного выбора управляющих воздействий требуется получение эквивалентов внешних по отношению к указанному району частей энергообъединения. Эти эквиваленты должны обеспечивать приемлемую точность расчета всех рассматриваемых режимов, включая несимметричные. Кроме того, эквивалентные модели, предназначенные для использования в задачах управления режимами, должны обеспечивать возможность корректировки их параметров по данным оценивания состояния при изменении оперативных условий в энергообъединении.

Эквивалентирование энергосистем для расчетов потокораспределения основано на понижении размерности уравнений установившегося режима. Эти уравнения в общем случае являются нелинейными и задача понижения их размерности путем исключения части неизвестных не имеет общего решения. Это приводит к необходимости замены исключаемых нелинейных уравнений установившегося режима на линейные, что позволяет выполнить строгое исключение переменных. Такое исключение обычно производится путем определения эквивалентных узловых токов или проводимостей (сопротивлений) на основе предварительного расчета режима полной схемы [1] или по номинальным напряжениям. Последний метод может приводить к существенным погрешностям и потому допустим только для ориентировочных расчетов. Использование эквивалентных

токов и проводимостей связано с допущением о неизменности значений сопротивлений Z_{ii} или токов I_{ii} нагрузок, а также модулей и фаз ЭДС (напряжений) генераторов при возмущениях режима. В действительности же при изменениях режима мощности нагрузок меняются в соответствии со статическими характеристиками по напряжению U_{ii} и значения их сопротивлений и токов не остаются постоянными. Из рассмотрения типовых статических характеристик видно, что Z_{ii} и I_{ii} существенно изменяются при вариации U_{ii} . При этом наибольшие их отклонения имеют место при снижении напряжения. Поэтому замена нагрузок токами или сопротивлениями (проводимостями) может приводить к значительной погрешности при расчете серии режимов, в особенности послеаварийных, характеризующихся значительными снижениями U_{ii} . Для генераторов при возмущениях режима неизменными можно считать только модули их напряжений, в то время как фазы U_{G} могут претерпевать существенные изменения.

Более строго учесть реальные характеристики генераторов и нагрузок, входящих в неконтролируемую часть сети, позволяет методика, предложенная в работах [3–5] и основанная на линеаризации уравнений установившегося режима эквивалентирования энергосистем. Однако предлагаемая в этих работах методика эквивалентирования применима только для симметричных режимов и базируется на однолинейном представлении трехфазных цепей. Такой подход непригоден в случае сложной несимметрии, что особенно проявляется при расчетах эквивалентирования энергосистем, питающих тяговые подстанции переменного тока. Однолинейное представление в этом случае может приводить к значительным погрешностям. Поэтому задача создания методов и алгоритмов, обеспечивающих решение задачи эквивалентирования электрических систем с учетом несимметрии токов и напряжений, имеет несомненную актуальность.

Широко применяемые алгоритмы расчета несимметричных режимов эквивалентирования энергосистем базируются на методе симметричных составляющих, согласно которому расчетная схема представляется тремя схемами замещения, соединенными только в месте несимметрии. Ос-

ПОСТРОЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ ЭНЕРГОСИСТЕМ ДЛЯ РАСЧЕТОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ

новым недостатком этого алгоритма заключается в сложности представления нескольких одновременных несимметрий. Применение различных систем несимметричных составляющих не устраняет указанного недостатка.

Наиболее эффективно задача расчета сложно-несимметричных режимов может быть решена на основе применения фазных координат. При их использовании электрическая система может описываться трехлинейной схемой или представляться в виде компаунд-сети. В первом случае каждый трехфазный элемент задается тремя сопротивлениями с электромагнитными связями или соответствующими схемами замещения. Число узлов расчетной схемы по отношению к однолинейной сети при этом утраивается. Во втором случае трехфазная сеть рассматривается как однолинейная, в которой каждая ветвь представляется в виде матрицы размерности 3×3 , а токи и напряжения – векторами размерности 3. Первый способ позволяет рассматривать любые многофазные элементы, например, линии электропередачи с тросами. При втором способе учет таких элементов существенно затрудняется.

Проведенный теоретический анализ показал, что для решения задач расчета режимов эквивалентирования энергосистем, питающих тяговые подстанции переменного тока, наиболее приемлемым является первый способ представления электрической сети в фазных координатах. При этом элементы системы замещаются решетчатыми схемами [6], что позволяет использовать хорошо разработанные алгоритмы расчета режимов эквивалентирования энергосистем.

В статье предлагается методика построения эквивалентных моделей энергосистем для расчетов несимметричных режимов, основанная на использовании фазных координат узловых напряжений.

Представим исходные нелинейные уравнения установившегося режима, описывающие режим эквивалентирования энергосистем, в виде:

$$\left. \begin{aligned} F_1(X_1, X_2) &= 0; \\ F_{21}(X_1, X_2) + F_{22}(X_2, X_3) &= 0; \\ F_3(X_2, X_3) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где

$$F_1(X_1, X_2) = [F_{A1}(X_1, X_2) \quad F_{B1}(X_1, X_2) \quad F_{C1}(X_1, X_2)]^T$$

– вектор-функция небалансов мощности в узлах контролируемой части эквивалентирования энергосистем; А, В, С – индексы фаз трехфазной сети;

$$F_{21}(X_1, X_2) = [F_{A21}(X_1, X_2) \quad F_{B21}(X_1, X_2) \quad F_{C21}(X_1, X_2)]^T$$

– вектор-функция, отвечающая перетокам мощности из контролируемой части сети к граничным узлам;

$$F_{22}(X_2, X_3) = [F_{A22}(X_2, X_3) \quad F_{B22}(X_2, X_3) \quad F_{C22}(X_2, X_3)]^T$$

– вектор-функция небалансов в граничных узлах;

$$F_3(X_2, X_3) = [F_{A3}(X_2, X_3) \quad F_{B3}(X_2, X_3) \quad F_{C3}(X_2, X_3)]^T$$

– вектор-функция небалансов в узлах неконтролируемой части сети;

$$X_1 = [X_{A1} \quad X_{B1} \quad X_{C1}]^T,$$

$$X_2 = [X_{A2} \quad X_{B2} \quad X_{C2}]^T,$$

$$X_3 = [X_{A3} \quad X_{B3} \quad X_{C3}]^T$$

– векторы режимных параметров (действительные и мнимые составляющие или модули и фазы узловых напряжений), соответствующие району управления, граничным узлам и неконтролируемой части сети (рис. 1). Вектор-функции $F_1(X_1, X_2)$, $F_{21}(X_1, X_2)$, $F_{22}(X_2, X_3)$ и $F_3(X_2, X_3)$ в фазных координатах определяется по методике, предложенной в работе [6].

Наиболее строго влияние внешней сети на режим района управления можно учесть на основе нелинейной эквивалентной модели. Построение такой модели состоит в нахождении вектор-функции вида:

$$X_3 = \Phi(X_2), \quad (2)$$

с помощью которой система (1) преобразуется к виду:

$$\left. \begin{aligned} F_1(X_1, X_2) &= 0; \\ F_{21}(X_1, X_2) + D(X_2) &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

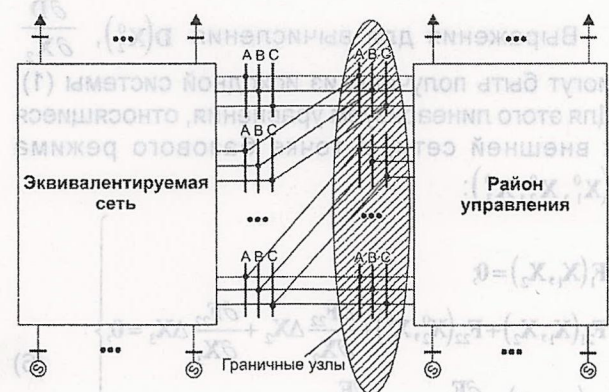


Рис.1. Исходная электрическая сеть

где $D(X_2) = F_{22}[X_2, \Phi(X_2)]$ – нелинейная вектор-функция, отражающая реакцию неконтролируемой части сети на изменение режима района управления.

Нахождение функции $D(X_2)$ связано с большими методическими и вычислительными трудностями. В этой связи представляют большой интерес работы по адаптивному эквивалентированию [2], позволяющие применять линейно-квадратичные модели.

Задачи расчета симметричного и несимметричного потокораспределения в эквивалентировании энергосистем позволяют перейти от рассмотренной нелинейной модели к линеаризованной. Это связано со спецификой этих задач, заключающихся в локализации возмущений режима в ограниченном районе, отвечающем району управления.

Для успешного применения методов линеаризации при эквивалентировании электрических систем необходимо, чтобы значения режимных параметров упрощаемой части энергосистемы в исследуемых режимах были близки к значениям, задаваемым в исходных приближениях. Иными словами, необходимо проводить линеаризацию уравнений установившегося режима относительно исходного (базового) режима, мало отличающегося в упрощаемой части энергосистемы от рассчитываемых. При этом влияние $D_N(X_2)$ нелинейных членов разложения функции $D(X_2)$ в ряд Тейлора

$$D(X_2) = D(X_2^0) + \frac{\partial D}{\partial X_2} \Delta X_2 + D_N(X_2) \quad (4)$$

будет мало. Поэтому нелинейные функции, отражающие реакции питающей сети на изменение режима в эквивалентировании энергосистем, с приемлемой для практики точностью могут быть заменены линейными.

В этом случае система (3) преобразуется к виду:

$$\left. \begin{aligned} F_1(X_1, X_2) &= 0; \\ F_{21}(X_1, X_2) + D(X_2^0) + \frac{\partial D}{\partial X_2} \Delta X_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Выражения для вычисления $D(X_2^0)$, $\frac{\partial D}{\partial X_2}$ могут быть получены из исходной системы (1). Для этого линеаризуем уравнения, относящиеся к внешней сети, в точке базового режима (X_1^0, X_2^0, X_3^0) :

$$\left. \begin{aligned} F_1(X_1, X_2) &= 0; \\ F_{21}(X_1, X_2) + F_{22}(X_2^0, X_3^0) + \frac{\partial F_{22}}{\partial X_2} \Delta X_2 + \frac{\partial F_{22}}{\partial X_3} \Delta X_3 &= 0; \\ F_3(X_2^0, X_3^0) + \frac{\partial F_3}{\partial X_2} \Delta X_2 + \frac{\partial F_3}{\partial X_3} \Delta X_3 &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где

$$\frac{\partial F_{22}}{\partial X_2} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{A22}}{\partial X_{A2}} & \frac{\partial F_{A22}}{\partial X_{B2}} & \frac{\partial F_{A22}}{\partial X_{C2}} \\ \frac{\partial F_{B22}}{\partial X_{A2}} & \frac{\partial F_{B22}}{\partial X_{B2}} & \frac{\partial F_{B22}}{\partial X_{C2}} \\ \frac{\partial F_{C22}}{\partial X_{A2}} & \frac{\partial F_{C22}}{\partial X_{B2}} & \frac{\partial F_{C22}}{\partial X_{C2}} \end{bmatrix};$$

$$\frac{\partial F_{22}}{\partial X_3} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{A22}}{\partial X_{A3}} & \frac{\partial F_{A22}}{\partial X_{B3}} & \frac{\partial F_{A22}}{\partial X_{C3}} \\ \frac{\partial F_{B22}}{\partial X_{A3}} & \frac{\partial F_{B22}}{\partial X_{B3}} & \frac{\partial F_{B22}}{\partial X_{C3}} \\ \frac{\partial F_{C22}}{\partial X_{A3}} & \frac{\partial F_{C22}}{\partial X_{B3}} & \frac{\partial F_{C22}}{\partial X_{C3}} \end{bmatrix};$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial X_2} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{A3}}{\partial X_{A2}} & \frac{\partial F_{A3}}{\partial X_{B2}} & \frac{\partial F_{A3}}{\partial X_{C2}} \\ \frac{\partial F_{B3}}{\partial X_{A2}} & \frac{\partial F_{B3}}{\partial X_{B2}} & \frac{\partial F_{B3}}{\partial X_{C2}} \\ \frac{\partial F_{C3}}{\partial X_{A2}} & \frac{\partial F_{C3}}{\partial X_{B2}} & \frac{\partial F_{C3}}{\partial X_{C2}} \end{bmatrix};$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial X_3} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{A3}}{\partial X_{A3}} & \frac{\partial F_{A3}}{\partial X_{B3}} & \frac{\partial F_{A3}}{\partial X_{C3}} \\ \frac{\partial F_{B3}}{\partial X_{A3}} & \frac{\partial F_{B3}}{\partial X_{B3}} & \frac{\partial F_{B3}}{\partial X_{C3}} \\ \frac{\partial F_{C3}}{\partial X_{A3}} & \frac{\partial F_{C3}}{\partial X_{B3}} & \frac{\partial F_{C3}}{\partial X_{C3}} \end{bmatrix}.$$

Очевидно, что для точки базового режима выполняется равенство:

$$F_3(X_2^0, X_3^0) = 0. \quad (7)$$

После исключения неизвестных $\Delta X_3 = X_3 - X_3^0$ можно записать:

$$\left. \begin{aligned} F_1(X_1, X_2) &= 0; \\ F_{21}(X_1, X_2) + R^3(X_2) &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где

$$R^3(X_2) = F_{22}(X_2^0, X_3^0) + \left[\frac{\partial F_{22}}{\partial X_2} - \frac{\partial F_{22}}{\partial X_3} \left(\frac{\partial F_3}{\partial X_3} \right)^{-1} \frac{\partial F_3}{\partial X_2} \right] \Delta X_2.$$

Коэффициенты при линейных членах сводятся в матрицу:

$$C = \frac{\partial F_{22}}{\partial X_2} - \frac{\partial F_{22}}{\partial X_3} \left(\frac{\partial F_3}{\partial X_3} \right)^{-1} \frac{\partial F_3}{\partial X_2}. \quad (9)$$

Следует отметить, что эквивалентные перетоки мощности в исходном режиме $F_{22}(X_2^0, X_3^0)$ являются реальными перетоками и не «выравниваются» для выполнения граничных условий, как в других методиках эквивалентирования. Кроме того, возможна оперативная корректировка этих параметров на основе данных, поступающих по каналам телемеханики.

Можно рассматривать $R^3(X_2)$ как вектор эквивалентных нагрузок в узлах примыкания (рис. 2)

ПОСТРОЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ ЭНЕРГОСИСТЕМ ДЛЯ РАСЧЕТОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ



Рис. 2. Преобразованная схема сети

с регулируемыми эффектами, задаваемыми в виде матрицы C :

$$\left. \begin{aligned} P_{Ak} &= P_{Ak0} + \Delta P_{Ak}; \\ P_{Bk} &= P_{Bk0} + \Delta P_{Bk}; \\ P_{Ck} &= P_{Ck0} + \Delta P_{Ck}; \\ Q_{Ak} &= Q_{Ak0} + \Delta Q_{Ak}; \\ Q_{Bk} &= Q_{Bk0} + \Delta Q_{Bk}; \\ Q_{Ck} &= Q_{Ck0} + \Delta Q_{Ck}; \end{aligned} \right\}$$

где $P_{Ak}, Q_{Ak}, P_{Bk}, Q_{Bk}, P_{Ck}, Q_{Ck}$ — эквивалентные нагрузки узлов примыкания в базовом режиме, равные соответственно суммарным активным и реактивным перетокам от этого узла в неконтролируемую часть сети; $\Delta P_{Ak}, \Delta P_{Bk}, \Delta P_{Ck}, \Delta Q_{Ak}, \Delta Q_{Bk}, \Delta Q_{Ck}$ — изменения эквивалентных нагрузок в результате возмущений в районе управления.

При этом параметры $\Delta P_{Ak}, \Delta P_{Bk}, \Delta P_{Ck}, \Delta Q_{Ak}, \Delta Q_{Bk}, \Delta Q_{Ck}, k = 1 \dots m_r$ определяются в соответствии с (8) и (9) по выражению

$$\Delta Y_\phi = C \Delta X_2, \quad (10)$$

$$\Delta Y_\phi = \begin{bmatrix} \Delta P_{A1} & \Delta P_{B1} & \Delta P_{C1} & \dots & \Delta Q_{Amr} & \Delta Q_{Bmr} & \Delta Q_{Cmr} \end{bmatrix}^T;$$

m_r — число узлов примыкания (в однолинейном представлении).

Полученная эквивалентная модель энергосистем, в отличие от традиционных, не представляема в виде какой-либо электрической сети, но эта модель позволяет более строго учесть реальные свойства генераторов и нагрузок с их регулирующими устройствами.

Решение системы (8) можно осуществить на основе метода Ньютона. При этом на каждой итерации решается следующая система линейных уравнений:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial X_1} (X_1^{(k)}, X_2^{(k)}) & \frac{\partial F_1}{\partial X_2} (X_1^{(k)}, X_2^{(k)}) \\ \frac{\partial F_{21}}{\partial X_1} (X_1^{(k)}, X_2^{(k)}) & \frac{\partial F_{21}}{\partial X_2} (X_1^{(k)}, X_2^{(k)}) + C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_1^{(k)} \\ \dots \\ \dots \\ \Delta X_1^{(k)} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} F_1(X_1^{(k)}, X_2^{(k)}) \\ \dots \\ \dots \\ F_{21}(X_1^{(k)}, X_2^{(k)}) + F_{22}(X_2^{(0)}, X_3^{(0)}) + C(X_2^{(k)} - X_2^{(0)}) \end{bmatrix}$$

где k — номер итерации.

Выводы. Эквивалентные модели эквивалентирования энергосистем, основанные на использовании линеаризованных уравнений установившегося режима, записанных в фазных координатах, обладают следующими свойствами, обеспечивающими возможность их эффективного применения при расчетах симметричных и несимметричных режимов эквивалентирования энергосистем:

- точным воспроизведением параметров режимов в широком диапазоне их изменения;
- возможностью полного отображения частотных свойств элементов эквивалентирования энергосистем, что особенно важно для расчетов послеаварийных режимов, вызванных отключением мощных источников и потребителей электрической энергии;
- весьма малым временем, необходимым для получения эквивалента;
- точным воспроизведением потерь активной и реактивной мощности в электрической сети;
- возможностью оперативной корректировки эквивалентов по данным телеизмерений.

Литература

1. Качанова Н.А. Эквивалентирование схем и режимов электроэнергетических систем / Н.А. Качанова, Н.Н. Шелухин // Электричество. 1980. №12. С. 9–14.
2. Крумм Л.А. Методы адаптивного эквивалентирования в задачах анализа установившихся режимов электроэнергетической системы и управление ими / Л.А. Крумм, В.А. Мантров // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1989. №6. С. 19–32.
3. Конторович А.М. Эквивалентирование сложных электрических систем для противоаварийного управления // Методы исследования устойчивости электрических систем и их использование / А.М. Конторович, А.А. Меклин, А.В. Крюков. М., 1985. С. 87–93.
4. Конторович А.М. Разработка алгоритмов и программ эквивалентирования для задач противоаварийного управления энергосистемами / А.М. Конторович, Ю.В. Макаров, А.В. Крюков, В.Е. Сактоев // Передача и распределение электроэнергии в районах Севера. Апатиты: Кольский науч. центр АН СССР, 1989. С. 113–115.
5. Конторович А.М. Эквивалентирование сложных энергосистем для целей оперативного управления / А.М. Конторович, А.В. Крюков, Ю.В. Макаров, В.Е. Сактоев. Улан-Удэ: Изд-во Вост.-Сиб. технол. ин-т, 1989. 84 с.
6. Закарюкин В.П. Расчеты режимов электрических систем в фазных координатах / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков // Интеллектуальные и материальные ресурсы Сибири: Сб. науч. тр. Иркутск, 2003. С. 262–273.