

ОСОБЕННОСТИ ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЭЭС ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАЙОНОВ УПРАВЛЕНИЯ

ЗАО «Институт автоматизации энергетических систем»

О.В. Захаркин, Е.Ю. Ивахненко

В статье рассматривается алгоритм вычисления параметров внешнего эквивалента сети, позволяющий учесть статические характеристики эквивалентируемых узлов по частоте и напряжению, а также пределы регулирования реактивной мощности эквивалентируемых генераторов.

Применяемые в настоящее время системы противоаварийного управления предназначены для реализации управляющих воздействий (УВ) в ограниченных районах энергообъединений (ЭО). Выбор дозировки УВ осуществляется по адаптивным алгоритмам, которые используют математическую модель района управления, формируемую на основе телеметрических данных. При формировании модели района управления должна быть учтена неконтролируемая часть ЭО, так как она может оказывать существенное влияние на потокораспределение при оценке запаса устойчивости ЭЭС в послеаварийных режимах. Поэтому для правильного выбора УВ требуется получение эквивалентов, внешних по отношению к выделенному району ЭО, обеспечивающих приемлемую точность расчёта всех рассматриваемых режимов за счет выбранного состава элементов эквивалентов и учета их статических характеристик по частоте и напряжению.

В данной статье рассматриваются особенности алгоритма эквивалентирования расчетной схемы ОЭС Сибири при формировании математических моделей районов управления. Этот алгоритм реализован в составе технологического программного обеспечения координирующей системы противоаварийной автоматики ОЭС Сибири, установленной в ОДУ.

Подготовка к эквивалентированию. Перед эквивалентированием все параметры о схеме и режиме сети записываются в расширенную матрицу параметров схемы сети ЭЭС ($\underline{A}_{РАС}$), содержащую матрицу сетевых параметров $\underline{A}_{СЕТ}$ схемы, матрицу режимных параметров $\underline{A}_{РЕЖ}$ схемы и матрицу дополнительных параметров $\underline{A}_{ДОП}$ схемы (рис. 1). Размерность этой матрицы составляет $N_{УЗ} \times (N_{УЗ} + N_{РЕЖ} + N_{ДОП})$, где $N_{УЗ}$ – общее число узлов эквивалентируемой части схемы (исключаемые узлы и узлы примыкания схемы выделенного района управления).

$$\underline{A}_{РАС} = \left[\begin{array}{ccc|c} \underbrace{\underline{A}_{СЕТ}}_{N_{УЗ}} & \underbrace{\underline{A}_{РЕЖ}}_{N_{РЕЖ}} & \underbrace{\underline{A}_{ДОП}}_{N_{ДОП}} & \left. \vphantom{\begin{array}{ccc} \underline{A}_{СЕТ} & \underline{A}_{РЕЖ} & \underline{A}_{ДОП} \end{array}} \right\} N_{УЗ} \end{array} \right]$$

Рисунок 1 – Структура расширенной матрицы параметров

При формировании матрицы $\underline{A}_{РАС}$ используется линейная относительно токов математическая модель системы, преобразование элементов которой при использовании метода Гаусса выполняется через проводимости узлов и связей электрической сети. В качестве матрицы сетевых параметров $\underline{A}_{СЕТ}$ используется матрица собственных и взаимных проводимостей узлов \underline{Y} , а в качестве матрицы режимных параметров $\underline{A}_{РЕЖ}$ – матрица задающих токов узлов $\underline{J}_{ЗАД}$. Матрица \underline{Y} имеет размерность $N_{уз} \times N_{уз}$. Размерность матрицы $\underline{A}_{РЕЖ}$ можно записать как $N_{уз} \times N_{РЕЖ}$, где $N_{РЕЖ}$ – число столбцов, зависящее от способа разложения задающих токов узлов на составляющие.

В качестве составляющих задающего тока узла рассматривается ток генератора и ток нагрузки, учитываемой по квадратичной статической характеристике относительно напряжения. При этом задающий ток i -го узла представлен в виде:

$$\underline{J}_{задi} = \underline{J}_{Гi} + \underline{J}_{Нi}^S + \underline{J}_{Нi}^I + \underline{J}_{Нi}^Y,$$

где составляющие задающего тока определяются по формулам:

$$\underline{J}_{Гi} = \frac{P_{Гi} - jQ_{Гi}}{\hat{U}_i}, \quad \underline{J}_{Нi}^S = \frac{P_{Нi}^S - jQ_{Нi}^S}{\hat{U}_i}, \quad \underline{J}_{Нi}^I = \frac{P_{Нi}^I - jQ_{Нi}^I}{\hat{U}_i}, \quad \underline{J}_{Нi}^Y = \frac{P_{Нi}^Y - jQ_{Нi}^Y}{\hat{U}_i}.$$

Здесь $P_{Нi}^S$, $P_{Нi}^I$, $P_{Нi}^Y$ – составляющие активной мощности нагрузки, вычисляемые на основе коэффициентов статических характеристик по выражениям:

$$P_{Нi}^S = P_{Нi}^{НОМ} \cdot a_{0i}, \quad P_{Нi}^I = P_{Нi}^{НОМ} \cdot a_{1i} \cdot \left(\frac{U_i}{U_i^{НОМ}} \right), \quad P_{Нi}^Y = P_{Нi}^{НОМ} \cdot a_{2i} \cdot \left(\frac{U_i}{U_i^{НОМ}} \right)^2.$$

Аналогичным образом рассчитываются и составляющие реактивной мощности нагрузки:

$$Q_{Нi}^S = Q_{Нi}^{НОМ} \cdot b_{0i}, \quad Q_{Нi}^I = Q_{Нi}^{НОМ} \cdot b_{1i} \cdot \left(\frac{U_i}{U_i^{НОМ}} \right), \quad Q_{Нi}^Y = Q_{Нi}^{НОМ} \cdot b_{2i} \cdot \left(\frac{U_i}{U_i^{НОМ}} \right)^2.$$

Номинальные мощности нагрузки определяются по замерам мощностей ($P_{Нi}$, $Q_{Нi}$) и напряжений (U_i) в узлах:

$$P_{Нi}^{НОМ} = \frac{P_{Нi}}{a_{0i} + a_{1i} \cdot \left(\frac{U_i}{U_i^{НОМ}} \right) + a_{2i} \cdot \left(\frac{U_i}{U_i^{НОМ}} \right)^2},$$

$$Q_{Hi}^{НОМ} = \frac{Q_{Hi}}{b_{0i} + b_{1i} \cdot \left(\frac{U_i}{U_i^{НОМ}} \right) + b_{2i} \cdot \left(\frac{U_i}{U_i^{НОМ}} \right)^2}$$

При этом задающий ток узла содержит четыре составляющие и поэтому размерность матрицы $\underline{J}_{Зад}$ равна $N_{уз} \times 4$.

Матрица дополнительных параметров $\underline{A}_{Доп}$ содержит параметры узлов, преобразование которых осуществляется по формулам, отличным от формул преобразования элементов матрицы $\underline{A}_{РЕЖ}$ по схеме Гаусса. В число таких параметров входят: пределы регулирования реактивной мощности генераторов в узлах $Q_{Gi}^{min}, Q_{Gi}^{max}$, допустимые пределы изменения активной мощности генераторов в узлах $P_{Gi}^{min}, P_{Gi}^{max}$, номинальные мощности генераторов и коэффициенты статизма турбины $P_{Gi}^{НОМ}, \sigma_i$, коэффициенты статических характеристик нагрузки по частоте a_{fi}, b_{fi} . Если указанные дополнительные параметры попарно рассматривать как вещественную и мнимую часть комплексного числа, то можно составить матрицу дополнительных параметров $\underline{A}_{Доп}$, содержащую в каждой строке 4 комплексные величины. Поэтому размерность этой матрицы также равна $N_{уз} \times 4$.

Получение внешних эквивалентов. При определении параметров внешних эквивалентов к расчётной схеме района управления элементы расширенной матрицы $\underline{A}_{РАС}$ перенумеровываются таким образом, чтобы вначале шли параметры исключаемых узлов схемы, затем параметры узлов примыкания схемы района управления. Выделение узлов примыкания производится таким образом, чтобы узлы схемы района управления представляли собой изолированную часть схемы. При этих условиях формируется расширенная матрица $\underline{B}_{РАС}$, диагональные блоки которой образованы матрицей параметров внутренних узлов исключаемой части схемы $\underline{A}_{РАС}^{ВН}$ и матрицей параметров узлов примыкания $\underline{A}_{РАС}^{пр}$. В недиагональные блоки матрицы $\underline{B}_{РАС}$ ($\underline{A}_{РАС}^{пр-ВН}$, $\underline{A}_{РАС}^{ВН-пр}$) входят параметры связей между внутренними узлами расчётной схемы и её узлами примыкания.

$$|\underline{B}_{РАС}| = \begin{vmatrix} \underline{A}_{РАС}^{ВН} & \underline{A}_{РАС}^{ВН-пр} \\ \underline{A}_{РАС}^{пр-ВН} & \underline{A}_{РАС}^{пр} \end{vmatrix}$$

Исключив по схеме Гаусса диагональный блок $\underline{A}_{РАС}^{ВН}$:

$$\underline{A}_{рас}^{* пр} = \underline{A}_{рас}^{пр} - \underline{A}_{рас}^{пр-вн} \cdot \left(\underline{A}_{рас}^{вн} \right)^{-1} \cdot \underline{A}_{рас}^{вн-пр},$$

получим в блоке $\underline{A}_{рас}$ добавку в виде внешнего эквивалента к расчетной схеме района управления:

$$\underline{A}_{рас}^{* пр} = \underline{A}_{рас}^{пр} + \underline{A}_{э},$$

где $\underline{A}_{э}$ – матрица параметров внешнего эквивалента расчётной схемы.

Матрица параметров внешнего эквивалента расчётной схемы может быть определена путём вычитания из матрицы параметров узлов примыкания после эквивалентирования матрицы параметров узлов примыкания до эквивалентирования:

$$\underline{A}_{э}^{* пр} = \underline{A}_{рас}^{пр} - \underline{A}_{рас}^{* пр}.$$

Исключение узлов при определении параметров внешнего эквивалента осуществляется поочередно и имеет следующие особенности.

Преобразование элементов матриц сетевых и режимных параметров. Диагональный и недиагональные элементы j -го узла матрицы собственных и взаимных проводимостей узлов электрической сети, а также задающий ток j -го узла при исключении i -го узла преобразуются по формулам:

$$\underline{Y}_{jj}^* = \underline{Y}_{jj}^0 - \frac{\underline{Y}_{ji}^0 \cdot \underline{Y}_{ij}^0}{\underline{Y}_{ii}^0}, \quad \underline{Y}_{ji}^* = \underline{Y}_{ji}^0 - \frac{\underline{Y}_{ji}^0 \cdot \underline{Y}_{ij}^0}{\underline{Y}_{ii}^0}, \quad \underline{J}_j^* = \underline{J}_j^0 - \frac{\underline{Y}_{ji}^0}{\underline{Y}_{ii}^0} \underline{J}_i^0,$$

где: $\underline{Y}_{jj}^0, \underline{Y}_{ii}^0$ – собственные проводимости j -го и i -го узлов, $\underline{Y}_{ji}^0, \underline{Y}_{ij}^0$ – проводимости связей между ними. Преобразование задающего тока выполняется по отдельным составляющим.

В состав собственной проводимости узла входят только продольные проводимости связей с другими узлами:

$$\underline{Y}_{ii}^0 = \sum \underline{Y}_{ij}^0, \quad j \in m_i,$$

а поперечные проводимости связей и шунты в узлах переводятся в составляющую задающего тока нагрузки, соответствующую постоянству проводимости нагрузки (в число учитываемых связей входят и ранее появившиеся эквивалентные связи):

$$\underline{J}_{ni}^{Y^*} = \underline{J}_{ni}^{Y^0} + \underline{Y}_{i0}^0 \cdot \underline{U}_i + \sum \underline{Y}_{ij}^0 \cdot \underline{U}_i, \quad j \in m_i.$$

Данные операции необходимы для сохранения суммарных мощностей нагрузок и генерации в узлах исключаемой части схемы и в ее эквиваленте. Более подробно этот вопрос рассмотрен в приложении.

Мощности эквивалентного генератора и составляющих эквивалентной нагрузки в узлах примыкания на конечном этапе процесса эквивалентирования определяются по формулам:

$$\underline{S}_{гj}^{\Delta} = \underline{J}_{гj}^{\Delta} \cdot \hat{U}_j, \quad \underline{S}_{нj}^{\Delta S} = \underline{J}_{нj}^{\Delta S} \cdot \hat{U}_j, \quad \underline{S}_{нj}^{\Delta I} = \underline{J}_{нj}^{\Delta I} \cdot \hat{U}_j, \quad \underline{S}_{нj}^{\Delta Y} = \underline{J}_{нj}^{\Delta Y} \cdot \hat{U}_j.$$

В состав мощности эквивалентного генератора и эквивалентной нагрузки входят и собственные мощности генератора и нагрузки этих узлов.

В результате подключения внешнего эквивалента к узлам примыкания изменяются соотношения между составляющими мощности нагрузки, вследствие чего изменяются и коэффициенты статических характеристик нагрузки.

Номинальные мощности эквивалентных нагрузок в узлах примыкания рассчитываются по формулам:

$$P_{нj}^{\Delta ном} = P_{нj}^{\Delta S} + P_{нj}^{\Delta I} \cdot \left(\frac{U_j^{ном}}{U_j} \right) + P_{нj}^{\Delta Y} \cdot \left(\frac{U_j^{ном}}{U_j} \right)^2,$$

$$Q_{нj}^{\Delta ном} = Q_{нj}^{\Delta S} + Q_{нj}^{\Delta I} \cdot \left(\frac{U_j^{ном}}{U_j} \right) + Q_{нj}^{\Delta Y} \cdot \left(\frac{U_j^{ном}}{U_j} \right)^2.$$

Коэффициенты статических характеристик эквивалентных нагрузок определяются по выражениям:

$$a_{1j}^{\Delta} = \frac{P_{нj}^{\Delta I}}{P_{нj}^{\Delta ном}} \left(\frac{U_j^{ном}}{U_j} \right), \quad a_{2j}^{\Delta} = \frac{P_{нj}^{\Delta Y}}{P_{нj}^{\Delta ном}} \left(\frac{U_j^{ном}}{U_j} \right)^2, \quad a_{0j}^{\Delta} = 1 - a_{1j}^{\Delta} - a_{2j}^{\Delta},$$

$$b_{1j}^{\Delta} = \frac{Q_{нj}^{\Delta I}}{Q_{нj}^{\Delta ном}} \left(\frac{U_j^{ном}}{U_j} \right), \quad b_{2j}^{\Delta} = \frac{Q_{нj}^{\Delta Y}}{Q_{нj}^{\Delta ном}} \left(\frac{U_j^{ном}}{U_j} \right)^2, \quad b_{0j}^{\Delta} = 1 - b_{1j}^{\Delta} - b_{2j}^{\Delta}.$$

Преобразование элементов матрицы дополнительных параметров. Номинальная активная мощность эквивалентного генератора определяется путем разнесения номинальных мощностей исключаемых генераторов в той же пропорции, что при разнесении их рабочей активной мощности:

$$P_{гj}^{ном} = \sum P_{гi}^{ном} \cdot \frac{P_{гj}^{\Delta}}{\sum P_{гi}^{\Delta}}, \quad i \in N_{г}^{\Delta},$$

где $N_{г}^{\Delta}$ – число эквивалентируемых генераторов.

Аналогично определяются пределы активной и реактивной мощности генерации, только для пределов по реактивной мощности

используется не рабочая реактивная мощность генераторов, а резерв по реактивной мощности генератора в текущем режиме:

$$Q_{резі}^{\min} = Q_{гi}^{\min} - Q_{гi}, \quad Q_{резі}^{\max} = Q_{гi}^{\max} - Q_{гi},$$

$$\Delta Q_{гj}^{\text{Э} \min} = \sum Q_{резі}^{\min} \cdot \frac{Q_{гj}^{\text{Э}}}{\sum Q_{гi}}, \quad \Delta Q_{гj}^{\text{Э} \max} = \sum Q_{резі}^{\max} \cdot \frac{Q_{гj}^{\text{Э}}}{\sum Q_{гi}}, \quad i \in N_{г}^{\text{Э}}.$$

Пределы активной и реактивной мощности генерации, а также номинальная мощность генератора в узле примыкания находятся как сумма предельного значения (номинальной) мощности генератора в режиме и предельного (номинального) значения мощности от внешнего эквивалента:

$$Q_{гj}^{\text{Э} \max} = Q_{гj}^{\max} + \Delta Q_{гj}^{\text{Э} \max}, \quad Q_{гj}^{\text{Э} \min} = Q_{гj}^{\min} + \Delta Q_{гj}^{\text{Э} \min},$$

$$P_{гj}^{\text{Э} \max} = P_{гj}^{\max} + \Delta P_{гj}^{\text{Э} \max}, \quad P_{гj}^{\text{Э} \min} = P_{гj}^{\min} + \Delta P_{гj}^{\text{Э} \min},$$

$$P_{гj}^{\text{Э} \text{НОМ}} = P_{гj}^{\text{НОМ}} + \Delta P_{гj}^{\text{Э} \text{НОМ}}.$$

Коэффициент статизма турбины эквивалентного генератора определяется по формуле:

$$\sigma_j^{\text{Э}} = \frac{\sigma_j \cdot P_{гj}^{\text{НОМ}} + \Delta \sigma_j^{\text{Э}} \cdot \Delta P_{гj}^{\text{Э} \text{НОМ}}}{P_{гj}^{\text{НОМ}} + \Delta P_{гj}^{\text{Э} \text{НОМ}}}, \quad \text{где } \Delta \sigma_j^{\text{Э}} = \frac{\sum P_{гi}^{\text{НОМ}} \cdot \sigma_i}{\sum P_{гi}^{\text{НОМ}}}, \quad i \in N_{г}^{\text{Э}}.$$

Статические характеристики нагрузки по частоте определяются по следующим формулам:

$$a_{fj}^{\text{Э}} = \frac{a_{fj} \cdot P_{Hj} + \Delta a_{fj}^{\text{Э}} \cdot \Delta P_{Hj}^{\text{Э}}}{P_{Hj} + \Delta P_{Hj}^{\text{Э}}}, \quad b_{fj}^{\text{Э}} = \frac{b_{fj} \cdot Q_{Hj} + \Delta b_{fj}^{\text{Э}} \cdot \Delta Q_{Hj}^{\text{Э}}}{Q_{Hj} + \Delta Q_{Hj}^{\text{Э}}},$$

где: $\Delta a_{fj}^{\text{Э}} = \frac{\sum P_{Hi}^{\text{НОМ}} \cdot a_{fi}}{\sum P_{Hi}^{\text{НОМ}}}, \quad \Delta b_{fj}^{\text{Э}} = \frac{\sum Q_{Hi}^{\text{НОМ}} \cdot b_{fi}}{\sum Q_{Hi}^{\text{НОМ}}}, \quad i \in N_{г}^{\text{Э}}.$

Вывод. Предложен алгоритм вычисления параметров внешнего эквивалента сети, позволяющий учесть статические характеристики эквивалентруемых узлов по напряжению и частоте, и пределы регулирования реактивной мощности эквивалентных генераторов.

Приложение.

Рассмотрим схему сети ЭЭС вида (рис.2):

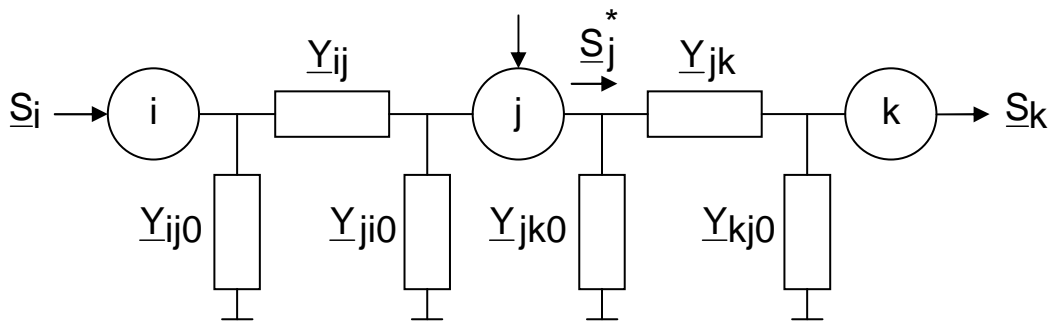


Рисунок 2 – Исходная схема

Установившийся режим ЭЭС рассчитан при заданных значениях задающих мощностей узлов. В результате определены напряжения узлов $\underline{U}_i, \underline{U}_j, \underline{U}_k$ и перетоки мощности по всем элементам схемы.

Поставлена задача получения эквивалентной схемы вида (рис.3):

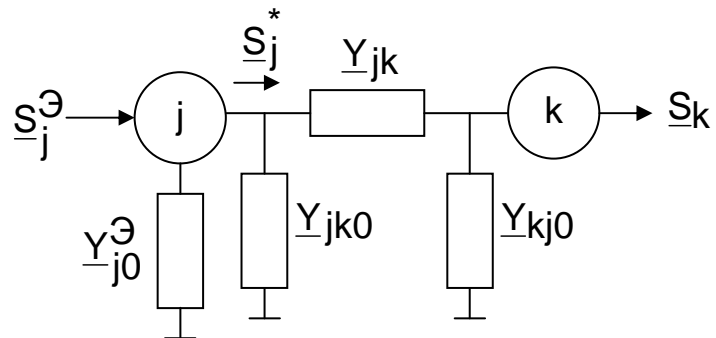


Рисунок 3 – Эквивалентная схема

В качестве критерия эквивалентности схем примем неизменность перетока мощности в начале связи “j – k” - \underline{S}_j^* .

Для исходной схемы (рис.2) значение перетока определяется по выражению:

$$\underline{S}_j^* = \underline{S}_j + (J_i - \underline{Y}_{ij0} \cdot \underline{U}_i - \underline{Y}_{ji0} \cdot \underline{U}_j) \cdot \underline{U}_j, \quad (1)$$

или иначе:

$$\underline{S}_j^* = \underline{S}_j + \underline{S}_i \cdot \frac{\underline{U}_j}{\underline{U}_i} - \underline{Y}_{ij0} \cdot \underline{U}_i \cdot \underline{U}_j - \underline{Y}_{ji0} \cdot \underline{U}_j^2. \quad (2)$$

Собственная проводимость i-го узла определяется по формуле:

$$\underline{Y}_{ii} = \underline{Y}_{ij0} + \underline{Y}_{ij}. \quad (3)$$

Собственная проводимость j -го узла содержит следующие составляющие:

$$\underline{Y}_{jj} = (\underline{Y}_{ji0} + \underline{Y}_{ji}) + (\underline{Y}_{jk0} + \underline{Y}_{jk}), \quad (4)$$

где первая скобка относится к связи “ $i - j$ ”, а вторая – к связи “ $j - k$ ”.

При общепринятом подходе к эквивалентированию схемы ЭЭС по методу Гаусса производится исключение i -го узла и рассчитываются новые значения собственной проводимости и задающего тока j -го узла:

$$\underline{Y}_{jj}^{\text{Э}} = \underline{Y}_{jj} - \frac{\underline{Y}_{ji} \cdot \underline{Y}_{ij}}{\underline{Y}_{ii}}, \quad \underline{J}_j^{\text{Э}} = \underline{J}_j + \frac{\underline{Y}_{ji}}{\underline{Y}_{ii}} \cdot \underline{J}_i. \quad (5)$$

Здесь в выражении для задающего тока эквивалента стоит знак (+) ввиду того, что в матрицу проводимостей недиагональные элементы заносятся с противоположным знаком.

Собственную проводимость эквивалента в узле “ j ”, учитывая состав схемы сети (рис.3), можно записать также в виде:

$$\underline{Y}_{jj}^{\text{Э}} = \underline{Y}_{j0}^{\text{Э}} + (\underline{Y}_{jk0} + \underline{Y}_{jk}), \quad (6)$$

где: $\underline{Y}_{j0}^{\text{Э}}$ - проводимость эквивалентного шунта на землю в узле “ j ” после исключения связи “ $i - j$ ” (без учета проводимости на землю связи “ $j - k$ ”).

С учетом (4) - (6) значение проводимости эквивалентного шунта на землю в j -ом узле будет равно:

$$\underline{Y}_{j0}^{\text{Э}} = \underline{Y}_{ji0} + \underline{Y}_{ji} - \frac{\underline{Y}_{ji} \cdot \underline{Y}_{ij}}{\underline{Y}_{ij0} + \underline{Y}_{ij}}. \quad (7)$$

Задающая мощность эквивалента в j -ом узле определяется по выражению:

$$\underline{S}_j^{\text{Э}} = \left(\underline{J}_j + \frac{\underline{Y}_{ji}}{\underline{Y}_{ij0} + \underline{Y}_{ij}} \cdot \underline{J}_i \right) \cdot \hat{U}_j = \underline{S}_j + \frac{\underline{Y}_{ji}}{\underline{Y}_{ij0} + \underline{Y}_{ij}} \cdot \frac{\hat{U}_j}{\hat{U}_i} \cdot \underline{S}_i. \quad (8)$$

При найденных по выражениям (7), (8) значениях проводимости эквивалентного шунта и эквивалентной задающей мощности в j -ом узле величина перетока в начале связи “ $j - k$ ” составит:

$$\underline{S}_j^{*\text{Э}} = \underline{S}_j^{\text{Э}} - \underline{Y}_{j0}^{\text{Э}} \cdot U_j^2 = \underline{S}_j + \frac{\underline{Y}_{ji}}{\underline{Y}_{ij0} + \underline{Y}_{ij}} \cdot \frac{\hat{U}_j}{\hat{U}_i} \cdot \underline{S}_i - \left(\underline{Y}_{ji0} + \underline{Y}_{ji} - \frac{\underline{Y}_{ji} \cdot \underline{Y}_{ij}}{\underline{Y}_{ij0} + \underline{Y}_{ij}} \right) \cdot U_j^2. \quad (9)$$

Разность между значениями перетока по связи “ $j - k$ ” в исходной и эквивалентной схемах определяется по формуле:

$$\underline{\Delta S}_j^* = \underline{S}_j^{*\text{Э}} - \underline{S}_j^* = \underline{S}_i \cdot \frac{\hat{U}_j}{\hat{U}_i} \cdot \left(\frac{\underline{Y}_{ji}}{\underline{Y}_{ij0} + \underline{Y}_{ij}} - 1 \right) + \underline{Y}_{ij0} \cdot \underline{U}_i \cdot \hat{U}_j - \left(\underline{Y}_{ji} - \frac{\underline{Y}_{ji} \cdot \underline{Y}_{ij}}{\underline{Y}_{ij0} + \underline{Y}_{ij}} \right). \quad (10)$$

Из полученного выражения следует, что при использовании метода Гаусса для эквивалентирования схемы ЭЭС, представленной матрицей собственных и взаимных проводимостей узлов, правильный результат

может быть получен только в условиях симметричных параметров связей и нулевых значениях проводимостей узлов на землю:

$$\underline{Y}_{ij} = \underline{Y}_{ji}, \quad \underline{Y}_{ij0} = \underline{Y}_{ji0} = 0. \quad (11)$$

Компенсация шунтов на землю (узловых или линейных) может быть обеспечена путем добавления мощности шунтов к задающим мощностям узлов:

$$\underline{S}_i^k = \underline{S}_i - \underline{Y}_{ij0} \cdot U_i^2, \quad \underline{S}_j^k = \underline{S}_j - \underline{Y}_{ji0} \cdot U_j^2. \quad (12)$$

При этом из собственной проводимости узла удаляется проводимость шунта на землю и тогда:

$$\underline{Y}_{ii} = \underline{Y}_{ij}, \quad \underline{Y}_{jj} = \underline{Y}_{ji} + \underline{Y}_{jk0} + \underline{Y}_{jk}. \quad (13)$$

В формулах (13) для i -го и j -го узлов исключены только проводимости на землю эквивалентруемой связи “ $i - j$ ”.

Теперь собственная проводимость j -го узла после исключения i -го узла по методу Гаусса будет равна:

$$\underline{Y}_{jj}^{\ominus} = \underline{Y}_{jj} - \frac{\underline{Y}_{ji} \cdot \underline{Y}_{ij}}{\underline{Y}_{ii}} = \underline{Y}_{jk0} + \underline{Y}_{jk}, \quad (14)$$

то есть после эквивалентирования в собственную проводимость эквивалентного узла не входят проводимости исключенной связи и $\underline{Y}_{j0}^{\ominus} = 0$.

Задающая мощность эквивалента при этом будет равна:

$$\underline{S}_j^{\ominus} = \underline{S}_j - \underline{Y}_{ji0} \cdot U_j^2 + \frac{\underline{Y}_{ji}}{\underline{Y}_{ij}} \cdot \left(\underline{S}_i - \underline{Y}_{ij0} \cdot U_i^2 \right) \cdot \frac{U_j}{U_i}. \quad (15)$$

Отметим, что предварительное исключение проводимости шунта на землю \underline{Y}_{ji0} связи “ $i - j$ ” можно не проводить, но учесть мощность этого шунта в задающей мощности j -го узла при его исключении.

После выполненных операций переток мощности в начале связи “ $j - k$ ” будет равен задающей мощности эквивалента в j -ом узле:

$$\underline{S}_j^{\ominus*} = \underline{S}_j^{\ominus}.$$

Из сопоставления выражений (2) и (15) для перетока мощности в начале связи “ $j - k$ ” видно, что они полностью совпадают при условии симметричности параметров ($\underline{Y}_{ij} = \underline{Y}_{ji}$) связи “ $i - j$ ”.

Отметим, что при переводе шунтов на землю в задающий ток значения мощностей эквивалентного генератора и эквивалентной нагрузки, полученные в условиях расчетной схемы ОЭС Сибири после исключения узлов восточной части системы от Красноярска до Иркутска, оказываются сопоставимыми с суммарными мощностями исключаемых генераторов и нагрузок. Без этого перевода значения мощностей эквивалента на порядок больше суммарных мощностей.

Контактная информация

Захаркин Олег Владимирович, к.т.н., заведующий научно-исследовательской лабораторией ЗАО «ИАЭС»
630132, Новосибирск, ул. Железнодорожная, 12/1.
Тел. (383)-363-02-65

Ивахненко Елена Юрьевна, н.с. научно-исследовательской лаборатории ЗАО «ИАЭС»
630132, Новосибирск, ул. Железнодорожная, 12/1.
Тел. (383)-363-02-65, сот. 214-01-91
eyi@iaes.ru