

ет определять узлы размещения и величину необходимой потребляемой (генерируемой) реактивной мощности для минимизации токов ветвей и улучшения качества электроэнергии по несимметрии, установившемуся отклонению напряжения в узлах.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Применение алгоритмов случайного поиска позволяет определять оптимальные места размещения корректирующих устройств и их мощности без использования градиентных методов. При этом максимальное количество узлов рас-

сматриваемой сети, т. е. размерность задачи, зависит только от возможностей ЭВМ.

2. Полное описание топологии сети с использованием методов расчета сложносвязанных сетей позволяет учитывать конфигурацию любой сети и выбирать управляющие воздействия в каждом индивидуальном случае.
3. Дальнейшее развитие алгоритмов управления качеством электроэнергии предполагает учет динамически изменяющихся потребляемых мощностей и управление качеством электроэнергии с использованием алгоритмов адаптивного управления регулирующими корректирующими устройствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Растринин Л.А. Статистические методы поиска. — М.: Наука, 1968. — 375 с.
2. Минаков И.А. Сравнительный анализ некоторых методов случайного поиска и оптимизации // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 1999. — № 2. — С. 286–293.
3. Lewis R., Virginia T. Pattern Search Algorithms for Bound Constrained Minimization // SIAM Journal on Optimization. — 1999. — № 4. — С. 1082–1099.
4. Жежеленко И.В. и др. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. — Киев: Техника, 1981. — 160 с.
5. Дрехслер Р. Коэффициент мощности и потери в сети при несимметричном и нелинейном потребителе // Электричество. — 1982. — № 2. — С. 12–16.
6. Аввакумов В.Г. Постановка и решение электроэнергетических задач исследования операций. — Киев: Вища школа, 1983. — 240 с.

Поступила 18.09.2007 г.

УДК 621.311.016.361

ОБОБЩЕННЫЕ СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОДСИСТЕМ И ИХ КОЭФФИЦИЕНТЫ КРУТИЗНЫ

В.И. Готман, Г.З. Маркман

Томский политехнический университет
E-mail: mo@elti.tpu.ru

Рассматривается представление частей электроэнергетических систем обобщенными статическими характеристиками. Обсуждается методика расчета коэффициентов крутизны обобщенных статических характеристик в зависимости от особенностей эквивалентруемых подсистем. Обобщенные статические характеристики и их коэффициенты крутизны дают эквивалентную информацию об энергетических подсистемах и могут быть использованы при оценке статической аperiodической устойчивости энергосистем.

Коэффициенты крутизны и регулирующие эффекты нагрузки и генераторов широко используются в расчетах режимов и оценках статической устойчивости электрических систем [1]. Практический интерес представляют статические характеристики и коэффициенты крутизны не только отдельных элементов систем, но и их сложных совокупностей, образующих подсистему. Обобщенные статические характеристики и их коэффициенты крутизны дают эквивалентную информацию о состоянии подсистемы. В зависимости от условий, принятых при эквивалентировании, будем выделять подсистемы, в которых отсутствуют балансирующие узлы по активной мощности и подсистемы, содержащие узлы балансирования активной мощности. В данной работе впервые приведены

расчетные выражения для определения коэффициентов крутизны статических характеристик сложных электроэнергетических подсистем.

Обратимся к подсистеме без балансирующих узлов по активной мощности. Условимся часть системы, имеющей связь с основной или смежной частью в единственном узле i , называть ограниченной частью (рисунк). Предположим, что в некотором исходном установившемся режиме в основной части электрической системы возникло стационарное возмущение, которое привело к изменению модуля ΔU_i и фазы $\Delta \delta_i$ напряжения узла, к которому примыкает ограниченная подсистема. В указанной подсистеме остаются неизменными: схема сети, состав оборудования (включая потребителей), коэффициенты трансформации, уставки первичных и вторич-

ных регуляторов. Два последних условия адекватны неизменности активной мощности источников. Проанализируем изменения, которые происходят в выделенной подсистеме при поочередном и независимом появлении возмущений ΔU_i и $\Delta \delta_i$.

Под воздействием приложенного возмущения ΔU_i ($\delta_i = \text{const}$) произойдет деформация режимных параметров подсистемы. Активная мощность источников питания остается неизменной, а мощность нагрузочных узлов (в соответствии со статическими характеристиками) и потери в элементах сети изменятся. В подсистеме образуется небаланс активной (ΔP) и реактивной (ΔQ) мощностей, который устремится к узлу i .

При стационарном приращении фазы $\Delta \delta_i$ ($U_i = \text{const}$) подсистема движется как единое целое относительно синхронной оси узла i . Векторы напряжений всех узлов подсистемы изменятся на такой же угол, как и приращение фазы в общем узле i . Относительные углы векторов напряжений подсистемы остаются неизменными. Неизменным остается и ее режим, что свидетельствует об отсутствии реакции со стороны подсистемы на указанное возмущение $\Delta \delta_i$. Так как ограниченная подсистема имеет единственную связь с основной частью, то функциональные зависимости

$$P_{ic} = P(U_i); Q_{ic} = Q(U_i) \quad (1)$$

являются полным режимным эквивалентом подсистемы.

При известном исходном режиме системы обобщенные статические характеристики находятся путем расчета ряда установившихся режимов эквивалентруемой подсистемы при вариации модуля напряжения узла эквивалентирования. Узел эквивалентирования принимается за балансирующий по активной и реактивной мощностям. Расчеты позволяют представить зависимости (1) в табличной, графической или аналитической форме при соответствующей обработке результатов.

Схему подсистемы будем представлять в виде пассивного многополюсника (n -полюсника), к вершинам которого подключены двухполюсники, замещающие генераторы, источники реактивной мощности и нагрузки. Считаем, что элементы двухполюсников представлены своими статическими характеристиками по напряжению.

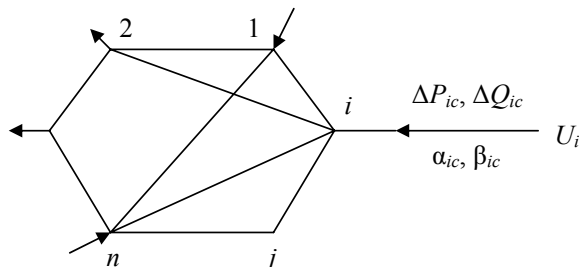


Рисунок. Эквивалентруемая подсистема

Рассмотрим расчет коэффициентов крутизны α_{ic} и β_{ic} обобщенных статических характеристик эквивалентруемой подсистемы (рисунок)

$$\alpha_{ic} = \partial P_{ic} / \partial U_i; \beta_{ic} = \partial Q_{ic} / \partial U_i$$

на базе приведенных ниже уравнений приращений, в которых α_i, β_i коэффициенты крутизны статических характеристик двухполюсников:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial U_1} - \alpha_1 & \frac{\partial P_1}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial U_n} & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \dots & 0 & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial P_2}{\partial U_1} & \frac{\partial P_2}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial U_n} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_1} & \dots & -1 & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial U_1} & \frac{\partial P_n}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial U_n} - \alpha_n & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_1} & \dots & 0 & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \\ \hline \frac{\partial Q_1}{\partial U_1} - \beta_1 & \frac{\partial Q_1}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \dots & 0 & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial U_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_1} & \dots & 0 & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial U_1} & \frac{\partial Q_n}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial U_n} - \beta_n & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_1} & \dots & 0 & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \vdots \\ \Delta U_n \\ \Delta \delta_1 \\ \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \Delta Q_{ic} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Для расчета коэффициента β_{ic} полагаем, что к узлу i прикладывается возмущение ΔQ_{ic} при закреплённой фазе вектора напряжения в узле эквивалентирования i ($\delta_i = \text{const}$), который одновременно является балансирующим по активной мощности, что отражено элементом $a_{i,n+i} = -1$ в матрице W_β . Путем решения системы (2) относительно ΔU_i при заданном ΔQ_{ic} находим коэффициент

$$\beta_{ic} = \partial Q_{ic} / \partial U_i = D_\beta / A_{\beta(n+i,i)}, \quad (3)$$

где D_β — определитель, $A_{\beta(n+i,i)}$ — алгебраическое дополнение матрицы W_β .

При расчете коэффициента α_{ic} , аналогично предыдущему, считаем, что к узлу i прикладывается внешнее возмущение ΔP_{ic} при условии ($\delta_i = \text{const}$). Узел i является балансирующим по реактивной мощности. Для получения матрицы W_α достаточно в столбце $n+i$ матрицы W_β элементом, отличным от нуля, считать $a_{n+i,n+i} = -1$. Тогда:

$$\alpha_{ic} = \partial P_{ic} / \partial U_i = D_\alpha / A_{\alpha(i,i)}, \quad (4)$$

где D_α — определитель, $A_{\alpha(i,i)}$ — алгебраическое дополнение матрицы W_α . При этом $A_{\alpha(i,i)} = -A_{\beta(n+i,i)}$.

Рассмотрим замещение ограниченной подсистемы, содержащей балансирующие по активной мощности узлы, эквивалентным двухполюсником с заданной статической характеристикой. Для указанной подсистемы целесообразно воспользоваться такой же формой представления статической характеристики, как и для генератора [2]:

$$Q_{ic} = Q(U_i, P_{ic}). \quad (5)$$

Из (5) имеем:

$$\Delta Q_{ic} = \frac{\partial Q_{ic}}{\partial U_i} \Delta U_i + \frac{\partial Q_{ic}}{\partial P_{ic}} \Delta P_{ic} = \beta_{ic} \Delta U_i + \eta_i \Delta P_{ic}. \quad (6)$$

Для отличия однотипных коэффициентов крутизны индекс коэффициента β , определяемого при условии $P_{ic} = \text{const}$ для подсистем с балансирующими по активной мощности узлами, будем заключать в круглые скобки.

Величина коэффициентов $\beta_{(ic)}$ и η_i зависит от распределения «небаланса» между генераторными и нагрузочными узлами подсистемы. В зависимо-

сти от решаемой задачи, этот «небаланс» может быть распределен между несколькими узлами генерации и нагрузки или же целиком отнесен к одному узлу. Линеаризованную систему уравнений (7) для расчета $\beta_{(ic)}$ подсистемы (рисунок) получаем при условии, что к узлу i приложено возмущение $\Delta Q_{(ic)}$ и $\delta_i = \text{const}$ (в качестве базисной может быть принята фаза напряжения любого узла)

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial U_1} - \alpha_{1...} & \frac{\partial P_1}{\partial U_i} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial U_n} & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \dots & -K_{1n} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial P_2}{\partial U_1} & \frac{\partial P_2}{\partial U_i} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial U_n} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_1} & \dots & 0 & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial U_1} & \frac{\partial P_n}{\partial U_i} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial U_n} - \alpha_n & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_1} & \dots & -1 & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_1}{\partial U_1} - \beta_{1...} & \frac{\partial Q_1}{\partial U_i} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \dots & -\eta_1 K_{1n} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial U_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial U_i} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_1} & \dots & 0 & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial U_1} & \frac{\partial Q_n}{\partial U_i} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial U_n} - \beta_n & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_1} & \dots & -\eta_n & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_i \\ \Delta U_n \\ \Delta \delta_1 \\ \Delta P_{ic} \\ \Delta \delta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \Delta Q_{ic} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Для общности балансирующими по активной мощности приняты все генераторные и нагрузочные узлы подсистем за исключением узла эквивалентирования. Часть общего «небаланса» активной мощности, воспринимаемого произвольным узлом j , принята в пропорции к приращению мощности узла n ($\Delta P_j = K_{jn} \Delta P_n$).

Коэффициенты η_j в (7) отличны от нуля только для генераторных узлов, участвующих в балансировании. Из (7) имеем:

$$\beta_{(ic)} = \partial Q_{ic} / \partial U_i = D_{(\beta)} / A_{\beta(n+i,i)}, \quad (8)$$

где $D_{(\beta)}$ – определитель, $A_{\beta(n+i,i)}$ – алгебраическое дополнение матрицы $W_{(\beta)}$.

Коэффициент η_i показывает, на сколько единиц нужно изменить реактивную мощность, передаваемую в узел i эквивалентируемой подсистемы, чтобы при изменении активной мощности узла i на единицу напряжения U_i осталось неизменным. Основываясь на этом определении и сохраняя те же узлы балансирования активной мощности, что и при расчете $\beta_{(ic)}$, можно получить линеаризованную систему, аналогичную (7). В новой системе матрица $W_{(\beta)}$ заменяется матрицей W_{η} , которая отличается от первой тем, что элементы столбца i равны нулю за исключением $a_{n+i,i} = -1$. Элементы этого столбца являются коэффициентами при ΔQ_{ic} . Правая часть рассматриваемой системы содержит возмущение ΔP_{ic} . При этих условиях имеем:

$$\eta_i = \partial Q_{ic} / \partial P_{ic} = A_{\eta(i,i)} / D_{\eta},$$

где D_{η} – определитель, $A_{\eta(i,i)}$ – алгебраическое дополнение матрицы W_{η} . Отметим, что $D_{\eta} = -A_{\beta(n+i,i)}$.

Осуществив деление выражения (6) на ΔU_i , получаем взаимосвязь между коэффициентами крутизны рассматриваемых видов статистических характеристик:

$$\beta_{(ic)} = \beta_{ic} - \eta_i \alpha_{ic}. \quad (9)$$

Условия связи (9) можно получить из физических соображений, основываясь на понятиях,

вкладываемых в те или иные коэффициенты и условия их расчета.

Прикладывая к узлу i энергосистемы (рисунок) возмущение ΔU_i при условии, что весь «небаланс» по активной мощности воспринимается двухполюсниками, а $\Delta P_{ic} = 0$, получаем реакцию ΔQ_{ic} . Отношение этой реакции к возмущению ΔU_i дает величину $\beta_{(ic)}$. Этот же результат можно получить, проводя последовательно два эксперимента и представляя соответственно результирующую реакцию ΔQ_{ic} в виде двух составляющих:

$$\Delta Q_{(ic)} = \Delta Q'_{ic} + \Delta Q''_{ic}. \quad (10)$$

Действительно, прикладывая внешнее возмущение ΔU_i и считая, что балансирующим по активной и реактивной мощностям является только узел i , получаем реакцию в виде $\Delta Q'_{ic}$ и ΔP_{ic} , которые связаны с возмущением известными соотношениями:

$$\Delta Q'_{ic} = \beta_{ic} \Delta U_i; \quad \Delta P_{ic} = \alpha_{ic} \Delta U_i. \quad (11)$$

Условие $\Delta P_{ic} = 0$, необходимое при расчете $\beta_{(ic)}$, здесь не соблюдено. Чтобы скомпенсировать реакцию ΔP_{ic} , приложим к узлу i возмущение $-\Delta P_{ic}$, при условии $U_i = \text{const}$. Считая, что «небаланс» активной мощности при этом опыте воспринимается двухполюсниками, имеем вторую составляющую реакции по реактивной мощности в узле i :

$$\Delta Q''_{ic} = -\eta_i \Delta P_{ic}. \quad (12)$$

С учетом (11) и (12) условие (10) переписывается так:

$$\Delta Q_{(ic)} = \beta_{ic} \Delta U_i - \eta_i \alpha_{ic} \Delta U_i.$$

Это равенство после деления на ΔU_i дает известную взаимосвязь (9).

Подсистему, имеющую несколько общих узлов с основной частью, можно искусственным путем разделить на ряд ограниченных по числу примыканий. Для этого необходимо в выделенной подсистеме разомкнуть ветви в узлах, в которых осуществляется «жесткое» регулирование напряжения, сохранив прежние значения параметров на концах разомкнутых ветвей. Прием разрезания ветвей в узлах с $U = \text{const}$ является совершенно строгим. Разрезание ветвей в наиболее удаленных узлах от узла эквивалентирования можно допустить и при нарушении условия неизменности напряжения. Основанием для этого может служить то обстоятельство, что статические характеристики и коэффициенты крутизны определяются, в основном, элементами и участками системы, расположенными наиболее близко к узлу эквивалентирования.

При небольших изменениях нормального режима коэффициенты крутизны β_{ic} , α_{ic} изменяются незначительно и могут быть приняты постоянными. По мере более глубокого изменения режима их следует корректировать.

Возможность представления эквивалентируемой подсистемы в виде четырехполюсника, содержащего ветвь комплексного сопротивления Z , к свободному концу которой приложена неизменная

эквивалентная ЭДС, рассмотрена в [3]. Исходной информацией для такого эквивалентирования являются параметры установившегося режима эквивалентируемой подсистемы и коэффициенты крутизны β , α .

Вывод

Замещение частей электрической системы эквивалентными двухполюсниками с заданными статическими характеристиками и коэффициентами кру-

тизны, позволяет в ряде случаев существенно сократить размерность электрической системы (число искоемых параметров). Такой подход является целесообразным при исследованиях и моделировании режимов отдельных станций, подстанций, расчетах предельных по статической аperiodической устойчивости режимов цепочечных схем (например, дальних электропередач с промежуточными системами). Это дает возможность в обобщенной форме учесть реакцию отдельных частей системы и непосредственно локализовать исследуемый объект.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левинштейн М.Л., Шербачев О.В. Методика расчетов статической устойчивости сложных электрических систем с помощью эквивалентных регулирующих эффектов станций и нагрузок // Известия вузов. Энергетика. – 1962. – № 8. – С. 11–19.
2. Цукерник Л.В., Коробчук К.В. Расчет с помощью ЦВМ предела статической устойчивости сложной энергосистемы // Докл. на II Всесоюз. науч.-техн. совещ. по устойчивости и надежности энергосистем СССР. – М.: Энергия, 1969. – С. 56–62.
3. Готман В.И., Готман О.В. Эквивалентирование подсистем энергообъединений на базе режимных параметров // Известия вузов. Электромеханика. – 2006. – № 3. – С. 111–114.

Поступила 20.09.2007 г.

УДК 621.311.016

ЕДИНЫЙ АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И РАСЧЕТ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОСИСТЕМ

В.И. Готман

Томский политехнический университет
E-mail: mo@elti.tpu.ru

Генераторы с автоматическим регулированием возбуждения при исследовании статической устойчивости режимов электрических систем учитываются передаточными функциями. Анализируются условия совпадения свободного числа характеристического уравнения и матрицы Якоби, используемой в расчетах установившихся режимов методом Ньютона, для различных идеализированных моделей генератора. Рассматриваются особенности использования практических критериев устойчивости.

Введение

Строгое решение задачи исследования статической устойчивости сложных энергосистем связано с анализом корней характеристического уравнения. Известно, что нарушение устойчивости может проявляться в форме самораскачивания или аperiodического характера изменения параметров режима (текущего режима или его сползания). Общепринятым является разделение этой задачи: определение границы нарушения колебательной и аperiodической устойчивости. Считая, что нарушение колебательной устойчивости устранено правильной настройкой системы автоматического регулирования возбуждения (АРВ), границе статической аperiodической устойчивости соответствует переход через ноль свободного члена характеристического уравнения (a_n) или практических критериев [1, 2].

Для исследования аperiodической устойчивости необходимы расчеты установившихся режимов и свободного члена характеристического уравне-

ния. В свою очередь, a_n получается из характеристического определителя (при обращении оператора дифференцирования $p=d/dt$ в ноль), соответствующего системе линеаризованных уравнений переходных процессов исследуемой энергосистемы. Использование метода Ньютона для расчета установившихся режимов требует вычисления матрицы коэффициентов линеаризованных уравнений установившегося режима (матрицы Якоби).

В работе [3] обсуждается совпадение a_n и якобиана для частных условий. В данной работе анализируется возможность максимального сближения структуры a_n и матрицы Якоби в общем случае. Решение задачи основано на представлении генераторов с АРВ их статическими характеристиками. В матрице a_n генераторы представляются коэффициентами крутизны их статических характеристик. При этом матрицу Якоби можно получить из матрицы a_n , учитывая те условия, которые принимаются в расчетах установившихся режимов, что позволяет оценить условия их адекватности.