

## АНАЛИЗ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ НА ОСНОВЕ ЗВЕЗДООБРАЗНЫХ МОДЕЛЕЙ

САВЕЛЬЕВ В.А., д-р техн. наук, ОСИКА Л.К., канд. техн. наук,

Предлагается новый подход к оперативному противоаварийному управлению на основе теории отображения в координатах активной и реактивной мощностей. Для иллюстрации подхода рассмотрены режимы при изменении активной мощности генераторов для трехузловой схемы на основе звездообразной модели.

*Ключевые слова:* электроэнергетические системы, противоаварийное управление, допустимость послеаварийных режимов, узловые уравнения, статические характеристики нагрузочных узлов, звездообразная модель.

## ANALYSIS OF ELECTRICAL POWER SYSTEM STEADY-STATE REGIME FOR ANTICRASH AUTOMATION CONTROL ACTION FORMING ON STAR-LIKE MODEL BASIS

L.K. OSSIKA, Ph.D., V.A. SAVELJEV, Ph.D.

The work represents a new approach upon the operative anticrash control on the base of mapping theory in active and jet power positions. To illustrate this approach, the authors analyze generator active power changing regimes for three-nodal circuit on star-like model basis.

*Key words:* electrical power systems, anticrash control, postemergency state admissibility, nodal equations, loading nodes static characteristics, star-like model.

При анализе режимов работы электро-энергетических систем (ЭЭС) возникает потребность в большом количестве расчетов, связанных с решением нелинейных уравнений их состояния. Такие расчеты проводятся для обеспечения требуемых коэффициентов запаса по статической и результирующей динамической устойчивости параллельной работы энергоузлов, для решения вопросов о местах установки и для формирования дозированных воздействий на разгрузку электростанций и отключения нагрузки для сохранения устойчивости в аварийных и послеаварийных режимах.

При расчетах устойчивости параллельной работы выявляются максимально допустимые набросы мощности на связи, оцениваются предельные значения одновременного выхода генерирующей мощности и сбросов нагрузки при отказах линий электропередач, выключателей, трансформаторов и др.

В связи с переходом системы оперативного и противоаварийного управления на новую элементную базу – микропроцессорную технику – особенно актуальными становятся вопросы совершенствования методов оперативного и противоаварийного управления на новых принципах их организации.

Нами предлагается новый подход к оперативному и противоаварийному управлению в целях сохранения статической устойчивости. Этот подход основан на теории отображения [1, 2], с помощью которой оценка существования решения узловых уравнений (УУ) производится в координатах только активных и реактивных мощностей узлов.

При решении задач оперативного и противоаварийного управления особое место занимает централизованный выбор дозировки управляющих воздействий противоаварийной автоматики путем быстрой оценки допустимости послеаварийных режимов за интервал стационарности режимных параметров. Использование полных моделей ЭЭС и традиционных итерационных методов для решения таких задач (методы Гаусса-Зейделя, Ньютона-Рафсона и т. д.) вызывает определенные трудности из-за потребности в больших ресурсах дозировки и высоких требований к быстродействию памяти устройств.

Отмеченные сложности можно преодолеть за счет усовершенствования известных методов итерационных расчетов. Такие подходы известны, например, в [3] приводится упрощенный алгоритм расчета установившегося режима с использованием приближенной матрицы Якоби и параметров  $(P-\delta, Q-U)$ , представляющих симметричную декомпозицию в методе Ньютона-Рафсона. Данный алгоритм обладает высокой скоростью сходимости и позволяет получать только аperiodически устойчивые режимы. Это обстоятельство может быть использовано и для определения величины дозировки управляющих воздействий.

Для большей оперативности получения результатов расчетов упрощают модели ЭЭС. К таким упрощенным моделям относится и предложенная в [4] методика оценки статической устойчивости ЭЭС в звездообразных эквивалентных схемах.

Представляет интерес также способ определения допустимости послеаварийных режимов, не связанный с расчетами потокораспре-

деления. Этот способ основан на теоремах существования отображения множества независимых параметров режима на множество зависимых параметров [4]. При этом вид отображения задается нелинейными УУ. Такой подход возможен, так как, с одной стороны, задача формирования управляющих воздействий не требует расчета конкретного потокораспределения, а требует только наличия режима, отвечающего определенным условиям. С другой стороны, допустимость режима может оцениваться по его существованию на заданном ограниченном множестве зависимых параметров (фазовых углов и модулей напряжений).

Применение неконструктивных теорем [5], дающих условия неподвижности точки отображения  $X = GX$  внутри выбранной области  $C$  зависимых переменных, сводится к исследованию  $GX$  либо во всей области  $C$ , либо на ее границе. Эта область в общем случае не является выпуклой [5], и, кроме того, можно установить границы сжатия по модулям напряжений и их фазовым углам в удобной для анализа форме, однако, как отмечено в [6], такой подход сложен. Поэтому прямая оценка существования решения УУ с помощью отображений для оперативных расчетов не приемлема. Преодолеть вышеуказанные трудности можно, организовав поиск монотонно возрастающего сжимающего отображения для специальных моделей энергосистем. Это позволит использовать лемму Канторовича [5], которая определяет наличие неподвижной точки  $X^*$  в области  $C$ , если  $GX -$  монотонно возрастает;  $GX' \in C, GX'' \in C$ , где  $X' \in \dot{C}, X'' \in \dot{C}, X' < X''$  ( $\dot{C}$  - граница множества  $C$ ).

Специальной моделью может быть, например, звездообразная (или сводящаяся к ней) схема (рис. 1, где 0 – балансирующий узел;  $i$  – центральный нагрузочный узел, принимаемый за базисный). В этом случае информацию о нагрузках на концах лучей звезды допустимо задавать постоянными значениями

$$P_k = \text{const}, \quad |\dot{U}_k| = \text{const},$$

используя выводы, приведенные в [4].

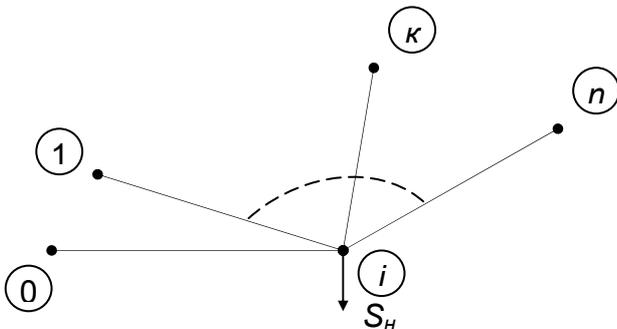


Рис. 1

Если принять, что в узле  $i$  нагрузка представлена постоянным значением полной мощности, то в узлах  $k$  ( $k = 0, 1, \dots, n$ ) нагрузка и генерация могут представляться постоянными значениями активной мощности и модулем напряжения или электродвижущей силы (ЭДС).

Тогда уравнение баланса мощности  $k$ -го узла запишется в виде

$$P_k = -E_k^2 g_{ik} - E_k U_i y_{ik} \sin(\delta_k - \alpha_{ik}), \quad (1)$$

где  $E_k$  – модуль напряжения (ЭДС)  $k$ -го узла;  $U_i$  – модуль напряжения центрального базисного узла;  $g_{ik}$  – активная проводимость ветви  $i-k$ ;  $y_{ik}$  – модуль проводимости ветви  $i-k$ ;  $\delta_k$  – фазовый угол напряжения  $k$ -го узла;  $\alpha_{ik} = 90^\circ - \Psi_k$  – дополнительный угол проводимости ветви  $i-k$ .

Уравнение (1) позволяет выразить значение угла  $\delta_k$  через напряжение центрального узла, приняв

$$\delta_k - \alpha_{ik} = \arcsin(A_k).$$

Тогда

$$A_k = -\frac{P_k + E_k^2 g_{ik}}{E_k U_i y_{ik}}. \quad (2)$$

Значение функции  $\arcsin(A_k)$  берется из диапазона  $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ .

Выражения для активной и реактивной составляющих баланса мощности центрального узла будут иметь вид

$$\begin{cases} P_i = U_i^2 g_{ii} - \sum_{k=1}^n E_k U_i y_{ik} \sin(-\delta_k - \alpha_{ik}) - \\ - E_o U_i y_{io} \sin(-\delta_o - \alpha_{io}), \\ Q_i = U_i^2 b_{ii} + \sum_{k=1}^n E_k U_i y_{ik} \cos(-\delta_k - \alpha_{ik}) + \\ + E_o U_i y_{io} \cos(-\delta_o - \alpha_{io}), \end{cases} \quad (3)$$

где  $E_o$  – модуль напряжения балансирующего узла;  $\delta_o$  – угол напряжения балансирующего узла.

Угол  $\beta = -\delta_o - \alpha_{io}$  лежит в диапазоне  $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ .

Если обозначить  $\sin(-\delta_i - \alpha_{io})$  из первого уравнения системы (3) как

$$A_o = \sin(-\delta_o - \alpha_{io}) = \frac{-P_i + U_i^2 g_{ii} - \sum_{k=1}^n E_k U_i y_{ik} \sin(-\delta_k - \alpha_{ik})}{E_o U_i y_{io}},$$

то система уравнений (3) сводится к одному уравнению с одним неизвестным:

$$Q_i = U_i^2 b_{ii} + \sum_{k=1}^n E_k U_i y_{ik} \cos(-\delta_k - \alpha_{ik}) + E_o U_i y_{io} \sqrt{1 - A_o^2}. \quad (4)$$

Учитывая, что

$$\cos(-\delta_k - \alpha_{ik}) = \sqrt{1 - A_k^2} \cos 2\alpha_{ik} - A_k \sin 2\alpha_{ik},$$

$$\sin(-\delta_k - \alpha_{ik}) = -(A_k \cos 2\alpha_{ik} + \sqrt{1 - A_k^2} \sin 2\alpha_{ik}),$$

получим

$$F(U_i) = U_i^2 b_{ii} + \sum_{k=1}^n (\cos 2\alpha_{ik} \sqrt{E_k^2 U_i^2 y_{ik}^2 - (P_k + E_k^2 g_{ik})^2} + \sum_{k=1}^n \sin 2\alpha_{ik} (P_k + E_k^2 g_{ik}) + \sqrt{E_0^2 U_i^2 y_{i0}^2 - [U_i^2 g_{ii} - P_i - \sum_{k=1}^n \cos 2\alpha_{ik} (P_k + E_k^2 g_{ik}) + E_k^2 U_i^2 y_{ik}^2 - (P_k + E_k^2 g_{ik})^2]^2} - Q_i = 0 \quad (5)$$

или

$$U_i^2 b_{ii} + \Phi(U_i) - Q_i = 0. \quad (6)$$

Если пренебречь активными проводимостями ветвей, то уравнение (5) примет вид

$$F(U_i) = U_i^2 b_{ii} + \sum_{k=1}^n \sqrt{E_k^2 U_i^2 b_{ik}^2 - P_k^2} + \sqrt{E_0^2 U_i^2 b_{i0}^2 - P_0^2} - Q_i = 0, \quad (7)$$

где  $P_0$  – активная мощность балансирующего узла.

Уравнения (6), (7) можно решить любым известным численным методом.

Для применения неконструктивных теорем существования выберем отображение

$$GU_i = U_i = \sqrt{\frac{Q_i - \Phi(U_i)}{b_{ii}}}. \quad (8)$$

Как показали численные исследования, такое отображение является сжимающим в широкой области, имеющей решение, и монотонно возрастающим при обычных соотношениях узловых и линейных параметров.

Следовательно, к уравнению (8) можно применить лемму Канторовича и сформулировать следующее утверждение: *если на множестве выбранных значений модулей напряжения центрального узла  $[U_{min}, U_{max}]$  отображение (8) такое, что*

$$\begin{aligned} GU_{min} &\in [U_{min}, U_{max}], \\ GU_{max} &\in [U_{min}, U_{max}], \end{aligned} \quad (9)$$

*то уравнения (6), (7) имеют решение в  $[U_{min}, U_{max}]$ .*

Следует отметить, что возможно более одного решения на выбранном множестве модулей напряжения, однако для поставленной задачи определения допустимости режимов это не играет существенного значения.

Кроме леммы Канторовича в данном случае можно воспользоваться следствием теоремы Лерэ-Шаудера [5]: если  $C \subset R^n$  – выпуклое открытое множество, содержащее начало координат, а  $G: \bar{C} \rightarrow R^n$  – непрерывное отображение и  $G\bar{C} \subset \bar{C}$ , то  $G$  имеет неподвижную точку в  $C$  ( $\bar{C}$  – замыкание множества  $C$ ). Этот результат удобен, если отображение  $G$  не является монотонно возрастающим.

При определении множества  $C$  в интервале  $[-\Delta U_{min}, \Delta U_{max}]$ , где  $-\Delta U_{min}, \Delta U_{max}$  – отклоне-

ния напряжения центрального нагрузочного узла относительно точки исходного режима  $U_0$ , принимаемой за начало координат, уравнение (8) преобразуется к виду

$$G(\Delta U_i) = G(U_i) - U_0,$$

где  $U_i = U_0 + \Delta U_i$ .

Таким образом, и условия существования решения легко получаются из (9).

Для практического применения полученных выражений необходимо определить диапазон допустимых значений  $U_i$ . Нижняя граница интервала выбирается как

$$U_{min} = \max(U_{min}^{ЭК}, U_{min}^K), \quad k = 1, \dots, n,$$

где  $U_{min}^{ЭК}$  – минимальное допустимое эксплуатационное значение напряжения нагрузочного узла, взятое, например, из «Методических указаний по устойчивости энергосистем» (СО 153-34.20.576-2003)<sup>1</sup>;  $U_{min}^K$  – минимальное напряжение центрального узла, при котором возможна передача мощности из узла  $k$ .

Значение  $U_{min}^K$  рассчитывается для каждого узла по формуле, вытекающей из (1):

$$U_{min}^K = \left| \frac{P_k + E_k^2 g_{ik}}{E_k y_{ik}} \right|.$$

Верхняя граница интервала  $U_{max}$  определяется эксплуатационными ограничениями на режим нагрузочных узлов.

Коэффициенты запаса устойчивости по перетокам мощности ( $K_p$ ) могут учитываться умножением узловых мощностей  $P_k$  на  $K_p$ . Запас устойчивости по  $U_i$  вводится соответствующим увеличением  $U_{min}$ .

При выбранных  $U_{min}$  в соответствии с СО 153-34.20.576-2003 условия (9) могут, хотя и редко, указывать на наличие статически аperiodически неустойчивого режима. Такую ситуацию можно легко устранить, используя для анализа критерий  $dF(U_i)/dU_i$  [6]. Это обусловлено принадлежностью исследуемой модели к классической схеме с узловой точкой. Анализ проводится в точке  $U_{min}$  по совпадению знака критерия с его знаком в заведомо устойчивом режиме [13]. Если режим оказался устойчивым, то при увеличении  $U_i$  от дальнейшей проверки можно воздержаться, так как функция

$$\frac{dF(U_i)}{dU_i} = \frac{d\Phi(U_i)}{dU_i} + 2U_i b_{ii} - \frac{dQ_i}{dU_i}$$

является монотонно возрастающей в устойчивой области.

Для иллюстрации предложенной методики рассмотрим серию режимов для простейшей трехузловой схемы (рис. 2) при изменении актив-

<sup>1</sup> Утверждены Приказом Минэнерго РФ от 30.06.2003 № 277.

ной мощности генератора в точке 2 (сопротивления даны в Омах, мощности – в МВт, МВар).

$U=100$

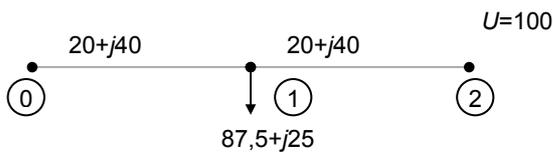


Рис. 2

Предельный режим данной схемы характеризуется следующими параметрами:  $P_2 = 152,716$  МВт;  $|\dot{U}_1| = 45,109$  кВ;  $\delta_2 = 68,658^\circ$ .

Результаты расчетов для далекого от предела, предельного и несуществующего режимов приведены в таблице. Расчеты подтверждают монотонность GU<sub>i</sub> и показывают зависимость положения точки отображения от величины GU<sub>max</sub>, GU<sub>min</sub>.

$P_2$	$U_1$ (решение)	$U_{1min}$	$U_{1max}$	GU <sub>1min</sub>	GU <sub>1max</sub>
50	81,394	75	120	78,135	94,586
160	не существует	75	120	67,9	89,6
152,716	45,109	75	120	69,154	89,99
152,716	45,109	75	120	45,05	89,99

Если за граничную точку множества  $[U_{min}, U_{max}]$  выбрать решение (5)  $U_i^*$ , то в этой точке  $F(U_i) = 0$  и  $U_i^* = GU_i^*$ .

Такое преобразование уравнений звездообразной схемы к одному уравнению относительно модуля напряжения центрального узла возможно и в случае задания на концах лучей звезды нагрузок в виде  $\dot{S}_H = P_H + jQ_H$  (рис. 3).

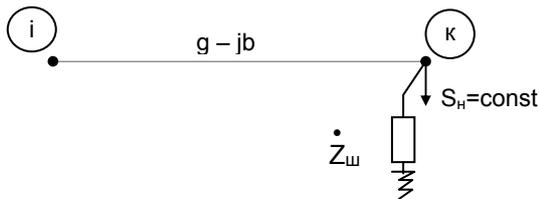


Рис. 3

Решая уравнения баланса мощностей k-го нагрузочного узла в декартовых координатах

$$\begin{cases} U_i U_k' g_{ik} - U_k'^2 g_{ik} - U_k''^2 g_{ik} - U_i U_k'' b_{ik} = P_k, \\ U_i U_k'' g_{ik} - U_k'^2 b_{ik} - U_k''^2 b_{ik} + U_i U_k' b_{ik} = Q_k, \end{cases} \quad (10)$$

найдем, что

$$U_k'' = \frac{Q_k g_{ki} - P_k b_{ki}}{U_i y_{ki}^2},$$

$$U_k' = \frac{1}{2} \left[ U_i \pm \sqrt{U_i^2 - 4 \left[ \frac{P_k g_{ki} + Q_k b_{ki}}{y_{ki}^2} + \left( \frac{Q_k g_{ki} - P_k b_{ki}}{U_i y_{ki}^2} \right)^2 \right]} \right]. \quad (11)$$

Во втором равенстве (11) перед корнем следует брать знак «плюс», так как в этом случае модуль напряжения k-го узла будет наибольшим. Далее подстановкой полученных значений  $U_k', U_k''$  в уравнения балансов центрального узла сведем их к одному уравнению относительно  $U_i$ , аналогичному (5).

Учет шунтов в нагрузочных узлах можно осуществить достаточно просто, если в (10) вместо  $U_i$  подставить эквивалентное напряжение

$$U_i^{\text{э}} = U_i \frac{\dot{Z}_{\text{ш}}}{\dot{Z}_{\text{ш}} + \dot{Z}_{ik}}.$$

Учесть статические характеристики нагрузочных узлов по концам лучей звезды в рассмотренной методике невозможно из-за необходимости аналитического решения уравнений четвертой степени, вытекающих из (10).

Разработанная методика оценки до и послеаварийных режимов звездообразных схем позволяет решать ряд задач противоаварийного управления мощностью ЭЭС, например, для определения допустимости режимов упрощенных моделей [4] и для анализа других схем, которые можно свести к многолучевой звезде. Возможность эквивалентного представления ЭЭС в виде многолучевой звезды с заранее вычисляемой погрешностью доказана в [7].

### Заключение

В задачах формирования дозировки управляющих воздействий противоаварийной автоматики допустимость послеаварийных режимов можно определять в результате прогнозирования изменений узловых уравнений на заранее заданном ограниченном множестве зависимых параметров режима.

Разработанный метод решений узловых уравнений в звездообразных моделях электрических систем на множестве допустимых значений модулей напряжений центрального узла позволяет оперативно решать ряд задач противоаварийного управления мощностью, используя как специализированные устройства, так и подсистемы АСУТП.

Реализация предложенного подхода позволит организовать работу противоаварийной автоматики с большим быстродействием, с использованием меньшего числа контролируемых параметров, меньшего числа устройств телемеханики и в целом упростит систему оперативно-го и противоаварийного управления.

### Список литературы

1. Васин В.П. Структура области существования самоустанавливающегося режима электроэнергетической системы в пространстве активных мощностей // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1981. – № 1.
2. Васин В.П. Структура множества установившихся режимов электроэнергетической системы // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1981. – № 4.

**3. Насыров Х.Х., Осика Л.К.** Применение упрощенных алгоритмов расчетов установившихся режимов для целей противоаварийной автоматики // Изв. АП УзССР, СТН. – 1980. – № 2.

**4. Богомолова И.А., Кощеев Л.А., Левит Л.М., Садовский Ю.Д.** Работы НИИПТ по усовершенствованию алгоритмов дозирования управляющих воздействий: Тез. докл. Всесоюз. совещ. «Опыт оптимизации электрических режимов работы энергосистем». – Баку, 1980.

**5. Ортега Дж., Рейнболдт В.** Итерациональные методы решения нелинейных систем уравнений со многими неизвестными. – М.: Мир, 1975.

**6. Галактионов Ю.И., Полтавский Б.М.** Алгоритм упрощения выделенных участков сложной энергосистемы / Тр. ВНИИЭ. Вып. 51. – М.: Энергия, 1976.

**7. Маркович И.М.** Режимы энергетических систем. – М.: Энергия, 1969.

Савельев Виталий Андреевич,  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования,  
телефон (4932) 26-99-43,  
e-mail: savelev@esde.ispu.ru

Осика Лев Константинович,  
ТГК-6,  
кандидат технических наук, заместитель генерального директора,  
телефон (4932) 26-99-43,  
e-mail: savelev@esde.ispu.ru