

Применение адаптивной модели энергосистемы для управления источниками реактивной мощности

ГВОЗДЕВ Д.Б., ИЛЮШИН П.В., КОЧКИН В.И., ФОКИН В.К., ФРОЛОВ В.И.

Рассматривается применение адаптивной модели энергосистемы для управления источниками реактивной мощности (ИРМ). Актуальность рассматриваемых вопросов определяется существенным внедрением ИРМ в энергосистемах. Поскольку в реальной электрической сети происходят суточные изменения схемно-режимной ситуации, требуется коррекция уставок регуляторов напряжения ИРМ, зависящая от параметров текущих режимов.

Ключевые слова: энергосистема, реактивная мощность, напряжение, регулирование, моделирование

В последние годы в энергосистемах России устанавливается все больше управляемых средств компенсации реактивной мощности (СКРМ) [1] и других устройств FACTS [2]. Для более эффективного использования возможностей указанных устройств необходима разработка более сложных алгоритмов управления ими. Параллельно с внедрением СКРМ совершенствуются методы и средства системы «Оценивание состояния» в направлении повышения достоверности определяемых параметров энергосистемы [3, 4]. В настоящее время на основании получаемых расчетных параметров установившихся режимов в задачи оперативно-технологического управления энергосистемой включается задача управления параметрами СКРМ. С помощью управляемых СКРМ в ряде случаев можно поддерживать экономически выгодные уровни напряжений в наиболее важных узлах электрической сети, перераспределять потоки мощности по линиям электропередачи для уменьшения потерь электроэнергии, увеличивать потоки передаваемой мощности по заданному сечению, обеспечивать режимы межсистемных связей с учётом ограничений по току, повышая тем самым надёжность энергообеспечения потребителей. Подобные предложения высказывались в технической литературе и раньше [5–8]. Однако для их реализации отсутствовали технические возможности, которые появились в связи с интенсивным развитием вычислительной техники в последнее время.

Поскольку в реальной электрической сети происходят суточные изменения схемно-режимной ситуации, для решения перечисленных задач требуется коррекция уставок регуляторов напряжения

Application of an adaptive model of a power system for control of reactive power sources is considered. The importance of matters being considered stems from a considerable scale on which reactive power sources are put in operation in power systems. Daily variations of the configuration and operating modes that occur in an actual electric network generate the need to adjust the setpoints of voltage controllers used in reactive power sources in accordance with the parameters of current operating modes.

Key words: power system, reactive power, voltage, control, simulation

СКРМ, зависящая от параметров текущих режимов.

Методы решения таких задач в общей постановке разработаны и описаны, например, в [5, 6]. Но они применимы для систем, в которых выполняются условия наблюдаемости и управляемости. В части больших энергосистем вопросы наблюдаемости и автоматизации процесса управления электрическими режимами решаются слабо и медленно. Для автоматизации требуется увеличение степеней свободы управления. Увеличение степеней свободы, которое достигается, в частности, внедрением дополнительных СКРМ, приводит к усложнению задачи оперативно-технологического управления электрическими режимами энергосистемы. В идеальном случае для управления СКРМ нужна информация о текущем электрическом режиме и схеме энергосистемы в целом. Причём её объём должен обеспечить восстановление установившегося режима (УР) по измеряемым параметрам (выполнение условия наблюдаемости). Предназначенная для решения этой задачи система «Оценивание состояния» в настоящее время с ней не справляется.

В условиях ограниченности информации о текущих режимах энергосистемы для эффективного управления работой СКРМ необходимы новые подходы, основанные на меньшем объеме исходных текущих параметров электрических режимов и конфигурации сети. Предпосылкой для этого является локальность действия СКРМ, каждое из которых может оказывать существенное влияние на напряжения электрически близких узлов, принадлежащих сравнительно небольшому фрагменту энергосистемы, что даёт возможность для определения уставок регуляторов каждого СКРМ воспользоваться

ся расчетной схемой (РС) фрагмента электрической сети. Эту схему можно считать упрощенной РС, получаемой из полной за счет исключения узлов, влиянием рассматриваемого СКРМ на которые можно пренебречь. При этом управление уставками регуляторов СКРМ с учетом параметров текущих режимов может быть реализовано системой управления с адаптивной моделью (АДМ) [9] на основе упрощенной РС. Перспективность применения такой системы управления в электроэнергетике рассматривалась, например, в [6]. В статье показана возможность применения данного подхода к решению задачи выбора уставок регуляторов напряжения СКРМ.

По существу, идея адаптивной модели реализуется в методике оперативного управления режимами энергосистем [6], когда для проверки результатов предполагаемых переключений используются упрощенные расчётные схемы, которые корректируются (адаптируются) в зависимости от параметров текущего режима и схемы соединений элементов энергосистемы с учётом отключений ВЛ, трансформаторов и другого оборудования. Источниками информации для формирования РС являются данные контрольных замеров (2 раза в год), ежедневные ведомости переключений, текущие значения некоторых параметров режима фрагмента сети из системы «Оценивание состояния». Под адаптивной моделью следует понимать упрощенную РС энергосистемы, набор статистических данных о графиках нагрузок, систематических и случайных погрешностях расчетов, а также разнообразную дополнительную информацию, позволяющую уточнять результаты идентификации УР.

Используя адаптивную модель, можно определить значения уставок напряжения (реактивной мощности) СКРМ на основании данных из локальной системы «Оценивание состояния». Очевидно, что процесс обработки информации, коррекция

параметров РС, проведение расчётов по определению уставок и их реализация должны протекать быстрее перехода из одного УР энергосистемы к другому, что стало возможным с применением современных вычислительных комплексов.

На рисунке представлена схема системы управления СКРМ на основе адаптивной модели.

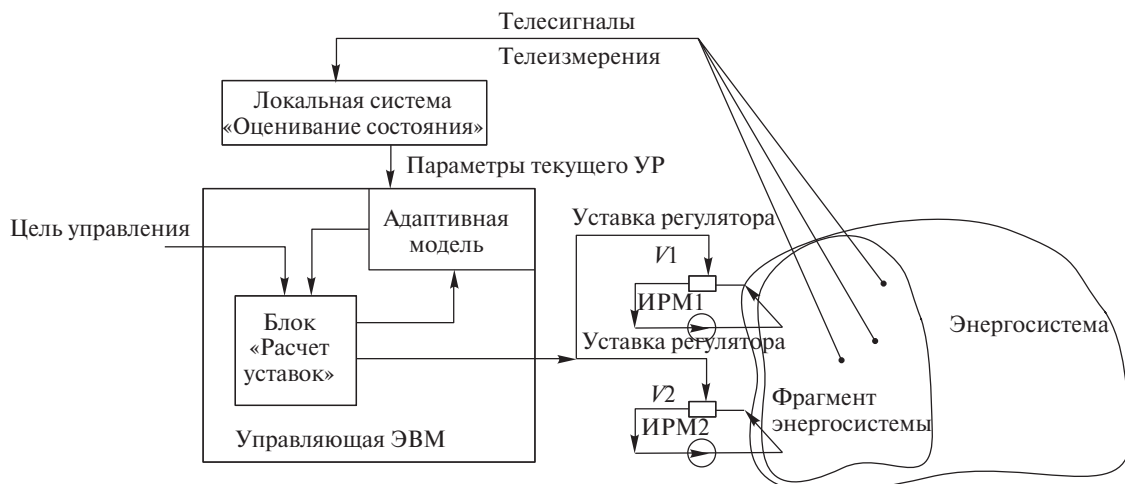
Блок «Оценивание состояния» обеспечивает адаптивную модель информацией о текущем УР фрагмента и схеме его соединений. Входными данными для локальной системы «Оценивание состояния» служат телеизмерения (ТИ) и телесигналы от соответствующих датчиков, установленных на подстанции фрагмента энергосистемы. Выходными данными являются напряжения в узлах, перетоки мощности по линиям электропередачи и трансформаторам, коэффициенты трансформации трансформаторов, уставки регуляторов СКРМ, положение коммутационной аппаратуры.

Блок «Адаптивная модель» представляет собой комплекс программ для расчета УР с разными вариантами заданий на расчет по РС фрагмента энергосистемы.

В блоке «Расчет уставок» на текущей адаптивной модели проводится вычисление значений уставок регуляторов напряжений, а также предусмотрен специальный вход для изменения целей управления. Расчетные и логические задачи решаются по специальным алгоритмам.

Из блока «Расчет уставок» полученные значения по каналам связи поступают в регуляторы напряжения СКРМ.

В [6] такая система управления отнесена к классу параметрически адаптивных. При реализации системы решающее значение будет иметь объем и точность информации, поступающей из энергосистемы в блок «Оценивание состояния». С проблемой управления связаны адекватность упрощенной РС и эффективность методов расчета уставок, ре-



Структурная схема автоматического управления СКРМ (1, 2) с адаптивной моделью

лизуемых в системе управления. Рассмотрим эти вопросы более подробно.

Определение уставок регуляторов напряжения.

Задача определения уставок регуляторов напряжения источников реактивной мощности решается в предположении, что известны: основные параметры РС рассматриваемой энергосистемы (N – число узлов, M – число ветвей, параметры генераторов, нагрузок, ветвей, параметры режимов и т.д.); число и размещение СКРМ с номером r в узле РС с номером n ($n=1, 2, \dots, N$; $r=1, 2, \dots, R$ – номера СКРМ); ограничения по реактивной мощности СКРМ $Q_{r\min}^n, Q_{r\max}^n$; диапазоны изменения уставок СКРМ $V_{r\min}^n < V < V_{r\max}^n$; число и размещение в РС контролируемых узлов с напряжением U_l^n , где $l=1, 2, \dots, L$ – номера контролируемых узлов с допускаемыми предельными значениями напряжений в этих узлах $U_{l\min}^n, U_{l\max}^n$.

Математические задачи, возникающие при расчетах управляющих воздействий, в простейшем случае сводятся к определению параметров уравнений, при которых решения обладают заданными свойствами [5], а метод, применяемый для решения, называется обобщенным методом приведенного градиента с критерием оптимизации, зависящим от переменных, заданных неявными функциями.

Применительно к энергосистеме из N узлов с регулируемыми R СКРМ с уставками напряжения задача заключается в следующем: в l контролируемых узлах требуется поддерживать напряжения равными значениям в диапазоне $U_{l\min}^n - U_{l\max}^n$.

Будем предполагать, что все неявные зависимости решений уравнений УР от параметров в диапазонах предполагаемых изменений существуют и имеют непрерывные производные.

Напряжения в узлах и реактивные мощности СКРМ являются неявными функциями уставок регуляторов, и задача сводится к решению уравнений:

$$U_l^n(V_r^n) = U_l^{n*}, \tag{1}$$

где $l = 1, 2, \dots, L$; $r = 1, 2, \dots, R$

При этом необходимо соблюдение следующих ограничений:

$$\begin{aligned} U_{l\min}^n &\leq U_l^n \leq U_{l\max}^n; \\ Q_{r\min}^n &\leq Q_r^n \leq Q_{r\max}^n; \\ V_{r\min}^n &\leq V_r^n \leq V_{r\max}^n, \end{aligned} \tag{2}$$

где $Q_{r\min}^n, Q_{r\max}^n$ – минимальная и максимальная реактивная мощность источника r в узле n РС; $U_{l\min}^n, U_{l\max}^n$ – минимальное и максимальное напряжение в контролируемых узлах сети; $V_{r\min}^n, V_{r\max}^n$ – минимальное и максимальное значение уставок СКРМ.

Система (1) может быть решена итерационным методом [5]. Каждая итерация – это решение задачи линейного программирования для системы линейаризованных уравнений, получаемых на основании того, что напряжения в контролируемых узлах при малых изменениях уставок являются их линейными функциями. Если в уравнениях опустить номера узлов n , то получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \Delta U_1 &= c_{11}\Delta V_1 + c_{12}\Delta V_2 + \dots + c_{1r}\Delta V_r; \\ \dots & \dots \dots \dots \tag{3} \\ \Delta U_v &= c_{v1}\Delta V_1 + c_{v2}\Delta V_2 + \dots + c_{vr}\Delta V_r. \end{aligned}$$

При этом коэффициенты уравнений (3) являются частными производными от напряжений контролируемых узлов по уставкам регуляторов напряжения. Если левые части считать равными заданным значениям напряжений U_1^*, \dots, U_v^* , то с учетом соотношений (3) получим уравнения относительно $\Delta V_1, \dots, \Delta V_r$:

$$\begin{aligned} \Delta U_1^* &= U_1 + c_{11}\Delta V_1 + c_{12}\Delta V_2 + \dots + c_{1r}\Delta V_r; \\ \dots & \dots \dots \dots \tag{4} \\ \Delta U_v^* &= U_v + c_{v1}\Delta V_1 + c_{v2}\Delta V_2 + \dots + c_{vr}\Delta V_r, \end{aligned}$$

где U_1, U_2, \dots, U_v – текущие значения модулей напряжений в контролируемых узлах.

Значения коэффициентов уравнений предлагается определять по результатам расчетов УР с малыми возмущениями $\Delta V_1, \dots, \Delta V_r$ путем вычисления отношений:

$$c_{11} = \Delta U_1 / \Delta V_1; \dots; c_{vr} = \Delta U_v / \Delta V_r. \tag{5}$$

В общем случае число уравнений в (4) равно числу узлов без СКРМ ($N-R$), а число неизвестных – числу СКРМ (R).

Из анализа системы (4) следует, что с помощью изменения уставки одного регулятора напряжения СКРМ можно поддерживать заданное значение напряжения только в одном контролируемом узле. Идеально для поддержания заданных значений напряжений во всех N узлах РС необходимо иметь N СКРМ, выполняя тем самым необходимое условие управляемости системы [6].

Если все узлы $N-R$ контролируемые, то число коэффициентов в уравнениях (4) равно произведе-

нию R ($N-R$). Однако даже при наличии десятков СКРМ задача не является безнадежной, так как по результатам расчета каждого возмущенного режима вычисляются все элементы одного столбца — ($N-R$) чисел. Таким образом, время, затраченное на вычисление коэффициентов системы (4), практически определяется числом управляемых СКРМ. Но полное решение задачи (с учетом ограничений) существенно зависит от числа узлов в РС.

Возможность решения таких задач для энергосистем до последнего времени осложнялась размерностью РС и отсутствием данных о текущих режимах.

Покажем, что коэффициенты уравнений системы (4) с достаточной точностью можно вычислять в упрощенной РС, для воспроизведения режимов которой необходимо значительно меньше данных.

Рассмотрим простой случай: определим значения уставок регуляторов напряжения двух СКРМ из условия снижения напряжения в узлах с U_1 и U_2 до значения U_{1M} и U_{2M} с учетом ограничений (2) в остальных контролируемых узлах. Предположим, что исходные данные удовлетворяют неравенствам:

$$U_1 - U_{1M} = \Delta U_1 > 0; \quad U_2 - U_{2M} = \Delta U_2 > 0.$$

В остальных узлах неравенства (2) выполняются и решение задачи существует. В этом случае оно определяется способом последовательного решения для выбираемых по специальному алгоритму пар узлов из тех, для которых нарушаются неравенства (2) (внешний цикл). Причем каждая задача решается итерационным методом Ньютона, так как необходимо пересчитывать коэффициенты уравнений (внутренний цикл).

Рассмотрим 1-ю итерацию в полной РС. Упорядочим узлы (и уравнения) таким образом, чтобы узлам с нарушенными ограничениями соответствовали первые два уравнения, а остальные упорядочим по убыванию суммы модулей коэффициентов $c_i = |c_{i1}| + |c_{i2}|$.

Система (4) примет вид:

$$\begin{aligned} \Delta U_1^0 &= U_1 + c_{11} \Delta V_1 + c_{12} \Delta V_2; \\ \Delta U_2^0 &= U_2 + c_{21} \Delta V_1 + c_{22} \Delta V_2; \\ &\dots \dots \dots \\ \Delta U_i^0 &= U_i + c_{i1} \Delta V_1 + c_{i2} \Delta V_2. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь U_i^0 — численные значения напряжений в контролируемых узлах упрощенной РС.

Для уравнений с номерами $i > I_\varepsilon$ (где I_ε — максимальный номер уравнения, в котором $c_i \geq \varepsilon$) из-за локальности действия СКРМ значения коэффициентов $|c_{i1}| + |c_{i2}|$ будут малы:

$$c_i = |c_{i1}| + |c_{i2}| < \varepsilon, \quad (7)$$

где ε — малая величина.

Тогда решением двух первых линейризованных уравнений будут значения уставок:

$$\begin{aligned} \Delta V_1 &= a_{11} \Delta U_1 + a_{12} \Delta U_2; \\ \Delta V_2 &= a_{21} \Delta U_1 + a_{22} \Delta U_2, \end{aligned}$$

где коэффициентами a_{ij} ($i, j = 1, 2$) являются элементы матрицы, обратной матрице системы из двух первых уравнений (6).

Эти значения будут результатом 1-й итерации метода Ньютона, примененного при решении задачи для выбранных двух узлов. Предположим, что точное решение, полученное в полной РС, будет равно ΔV_1^* , ΔV_2^* . Тогда напряжения в остальных узлах

$$U_l^0 = U_l + c_{l1} \Delta V_1^* + c_{l2} \Delta V_2^* \quad (l=3,4,\dots,L). \quad (8)$$

В общем случае для части из них окажутся нарушенными условия (2), и на 2-й итерации внешнего цикла надо решать задачу для этих узлов.

Однако после каждой внешней итерации для узлов с номерами $i > I_\varepsilon$ изменения напряжений будут удовлетворять неравенствам:

$$U_l^0 - U_l = |c_{l1} \Delta V_1^* + c_{l2} \Delta V_2^*| < \varepsilon (| \Delta V_1^* | + | \Delta V_2^* |).$$

А так как по условиям задачи возможные изменения уставок ограничены, то при некоторых значениях ε эти отклонения напряжений $|U_l^0 - U_l|$ не будут превышать допустимой погрешности расчетов η при любых допустимых значениях $| \Delta V_1^* |$ и $| \Delta V_2^* |$, т.е.

$$(| \Delta V_1^* | + | \Delta V_2^* |) \varepsilon < \eta, \quad (9)$$

откуда следует, что при решении задачи в полной РС уравнения, соответствующие узлам с малыми значениями c_i , можно исключить из системы (6) без ущерба для точности решения, что и происходит при использовании упрощенной РС [10].

Рассмотрим решение этой задачи в упрощенной РС в виде связанного фрагмента, в дополнении которого до полной РС содержатся только узлы с уравнениями, удовлетворяющими условию (9). Погрешности в этих узлах не изменятся, ими можно пренебречь. А в остальных узлах они будут определяться только точностью вычисления коэффициентов c_{ij} системы (4).

Следовательно, для узлов с номерами $i \leq I_\varepsilon$ погрешность вычисления напряжений определяется

погрешностью решений задачи нелинейного программирования, которая в свою очередь будет зависеть от погрешности вычисления коэффициентов c_{ji} .

Тем самым проблема приближенного решения поставленных задач сводится к получению такой РС, в которой можно было бы с достаточной точностью вычислять коэффициенты уравнений системы (4) как результаты расчетов УР с малыми возмущениями.

В общем случае коэффициенты c_{ji} , удовлетворяющие условиям (7), окажутся рассеянными по системе уравнений (6) случайным образом. Однако для электрической сети реакции на изменения генерации реактивной мощности в узле локализируются в относительно небольшом ее фрагменте. Это свойство позволяет при формировании упрощенных РС применить методику «ярусного эквивалентирования» [11, 12].

Основное требование к упрощенной РС состоит в том, чтобы результаты расчётов уставок по упрощенной и полной РС были близкими, а для этого необходимо, чтобы этим свойством обладали результаты расчетов УР с малыми возмущениями.

Формирование упрощенной РС. Первым шагом процесса формирования упрощенной РС является выделение для каждого СКРМ области существенного влияния (ОСВ).

Степень влияния СКРМ на напряжение узлов с нагрузкой связывают с электрической удалённостью этих узлов. При этом, если напряжение i -го узла существенно зависит от напряжения СКРМ, то и генерируемая им реактивная мощность также зависит от нагрузки i -го узла. Предполагая изменения параметров УР малыми, степень влияния СКРМ с уставкой регулятора напряжения U_p на напряжение U_i в узле i оценим относительными величинами – коэффициентами чувствительности [13]:

для узлов нагрузки, моделируемых уравнениями балансов активной и реактивной мощности [14] (PQ):

$$\lambda_i = \left| \Delta U_i / U_{p, \text{ном}} \right| / \left| \Delta U_p / U_{i, \text{ном}} \right|;$$

для узлов с СКРМ, моделируемых уравнениями баланса активной мощности и уравнениями (PU):

$$\mu_i = \left| \Delta Q_i \right| / \left| \Delta Q_p \right|,$$

где ΔQ_p – изменение реактивной мощности СКРМ при изменении уставки на ΔU_p ; ΔQ_i – изменение реактивной мощности в узле i .

К области существенного влияния данного СКРМ отнесём узлы, для которых при малых изменениях уставки регулятора напряжения параметры УР изменяются больше, чем на ρ : $\lambda_i, \mu_i > \rho$, где $\rho = k_0 \rho_M$ ($0 < k_0 < 1$), $\rho_M = \max_i \{\lambda_i, \mu_i\}$.

Например, к ОСВ компенсатора можно отнести узлы, для которых при изменениях уставки на 0,05 диапазона регулирования параметры УР изменяются больше, чем на 0,005 диапазона допустимых значений. Этим значениям соответствует $\rho = 0,1$.

При формировании упрощенной РС k_0 может выбираться с учетом возможностей локальной системы «Оценивание состояния»: числа узлов с ТИ и точности воспроизведения параметров текущего УР. Естественно, что от этого будет зависеть и точность оценки влияния СКРМ на режимы энергосистемы.

Одним из требований к точности является сохранение знаков производных для узлов из ОСВ:

$$\left| \lambda_i^p - \lambda_i \right| \leq \left| \lambda_i \right|, \quad \left| \mu_i^p - \mu_i \right| \leq \left| \mu_i \right|;$$

$$\left| (\Delta Q_{\text{СКРМ}} / \Delta U_p)^p - (\Delta Q_{\text{СКРМ}} / \Delta U_p) \right| \leq \left| (\Delta Q_{\text{СКРМ}} / \Delta U_p) \right|.$$

В соответствии с методикой ярусного эквивалентирования в программу в качестве задания вводятся контролируемые узлы и параметр, определяющий точность эквивалентирования. В расчетную схему для исследования группы СКРМ должны войти ОСВ и дополнительные узлы, обеспечивающие связность схемы. Для рассматриваемой задачи контролируемые узлы входят в ОСВ. ОСВ нескольких СКРМ является объединением ОСВ отдельных СКРМ. Взаимное влияние источников будем считать существенным, если их ОСВ пересекаются. Объединение пересекающихся ОСВ заключается в минимальный связный фрагмент (из узлов и ветвей РС). Очевидно, этой схеме будут принадлежать все СКРМ с существенным взаимным влиянием.

В качестве узлов 1-го яруса в программу вводится минимальный связный фрагмент, содержащий все узлы с управляемыми СКРМ и контролируемые узлы.

Программа в соответствии со значением требуемой точности расширяет РС, добавляя к заданным узлам 1-го яруса последовательно узлы 2-го яруса (как непосредственно связанные с узлами 1-го яруса), затем – узлы 3-го яруса (как непосредственно связанные с узлами 2-го яруса) и т.д., до k -го яруса включительно. При этом ветви, соединяющие узлы k -го яруса с узлами $(k+1)$ -го обрываются, а перетоки по ним заменяются дополнительными постоянными нагрузками в узлах k -го яруса, что соответствует (в предстоящих расчетах) постоянству перетоков по оборванным ветвям. После каждого расширения РС до k -го яруса контролируется погрешность расчета возмущенного УР с изменением задания на расчет, соответствующего изменению уставки регулятора СКРМ на заданное значение. Процесс расширения прекращается при выполнении условия: погрешность вычисления параметров

УР для узлов из ОСВ становится меньше требуемого значения ε .

Критерием точности является условие: разность значений коэффициентов чувствительности для полной (λ_i, μ_j) и упрощенной РС (λ_i^p, μ_j^p) меньше заданного значения ε :

$$\left| \lambda_i^p - \lambda_i \right| \leq \varepsilon; \quad \left| \mu_j^p - \mu_j \right| \leq \varepsilon; \quad (10)$$

$$\left| (\Delta Q_{\text{СКРМ}} / \Delta U_p)^p - (\Delta Q_{\text{СКРМ}} / \Delta U_p) \right| < \varepsilon Q_{\text{СКРМmax}} / U_{\text{р.ном}}, \quad (11)$$

где

$$\varepsilon < \min \left\{ \rho, \left| (\Delta Q_{\text{СКРМ}} U_{\text{р.ном}} / \Delta U_p Q_{\text{СКРМmax}}) \right| \right\}. \quad (12)$$

Условия (11) и (12) должны обеспечить физическую реализуемость упрощенной РС: напряжение в сети повышается при увеличении генерации реактивной мощности.

Методика, приведенная в [15], позволяет получить упрощенную РС, удовлетворяющую любой требуемой точности ε (в пределе упрощенная РС совпадет с исходной).

О погрешностях расчетов по упрощенной РС. Погрешность решения задачи на адаптивной модели будет определяться несколькими факторами. Это и точность идентификации УР, изменение режима во время вычислений новых значений уставок, изменения топологии РС. Оценим погрешность расчетов, вызванную применением упрощенной РС.

Предположим, что к моменту ввода новых уставок полная РС не изменилась. Тогда погрешность от упрощения РС будет связана с изменением перетоков по ветвям между k -м и $(k+1)$ -м ярусами при расчете возмущенного УР.

Пусть коэффициенты системы уравнений (3) вычисляются как результаты расчетов УР с малыми возмущениями уставок регуляторов напряжения СКРМ. Естественно, что они будут отличаться в случаях вычисления по полной и упрощенной РС, а разность будет определять погрешность из-за упрощения РС. Поясним физические причины локализации реакций на изменения генерации реактивной мощности.

Введем в полной РС ярусную структуру с узлом – управляемым СКРМ в первом ярусе. Рассмотрим фрагмент, соответствующий упрощенной РС, и запишем для него уравнение баланса реактивной мощности в следующем виде:

$$Q_{\text{вскрм}} + Q_{\text{скрм}} + Q_{\text{сб.к}} + Q_{\text{спот}} + Q_{\text{спер}} = 0, \quad (13)$$

где $Q_{\text{вскрм}} (>0)$ и $Q_{\text{скрм}} (>0)$ – мощность генерации управляемого и остальных СКРМ соответственно; $Q_{\text{сб.к}} (>0)$ – мощность генерации в конден-

саторных батареях и линиях передач; $Q_{\text{спот}} (<0)$ – мощность потерь; $Q_{\text{спер}} (<0)$ – суммарный переток через граничные ветви.

Запишем уравнение баланса реактивной мощности режима после возмущения – изменения уставки регулятора напряжения на $\Delta U_{\text{вскрм}} > 0$: для упрощенной РС

$$\Delta Q_{\text{вскрм}} + \Delta Q_{\text{скрм}} + \Delta Q_{\text{сб.к}} + \Delta Q_{\text{спот}} = 0; \quad (14)$$

для соответствующего ей фрагмента полной РС

$$\Delta Q_{\text{вскрм}} + \Delta Q_{\text{скрм}} + (\Delta Q_{\text{сб.к}} + \Delta Q_{\text{спот}}) + \Delta Q_{\text{спер}} = 0. \quad (15)$$

Уравнения (14) и (15) отличаются величиной $\Delta Q_{\text{спер}}$ – изменением перетоков реактивной мощности по граничным ветвям. Так как изменения перетоков по ветвям между k -м и $(k+1)$ -м ярусами фрагмента из k ярусов вызываются изменением генерации реактивной мощности рассматриваемого СКРМ, то в нормальных режимах $\Delta Q_{\text{спер}}$ является частью $\Delta Q_{\text{вскрм}}$, доходящей до ветвей между k -м и $(k+1)$ -м ярусами.

Запишем это в виде следующих условий: при $\Delta U_{\text{вскрм}} > 0$

$$\Delta Q_{\text{спер}} < 0; \quad \Delta Q_{\text{вскрм}} + \Delta Q_{\text{спер}} > 0; \quad (16)$$

при $\Delta U_{\text{вскрм}} < 0$

$$\Delta Q_{\text{спер}} > 0; \quad \Delta Q_{\text{вскрм}} + \Delta Q_{\text{спер}} < 0. \quad (17)$$

Для физически реализуемых режимов $\Delta Q_{\text{вскрм}} = k_v \Delta U_{\text{вскрм}}$, $k_v > 0$.

Рассмотрим подробнее последствия возмущения $\Delta U_{\text{вскрм}} > 0$. Для узлов с СКРМ в области регулируемых напряжений $\Delta Q_{\text{скрм}} < 0$.

Для нормальных режимов напряжения возрастут в большинстве узлов без СКРМ, а также в узлах с СКРМ, генерация в которых находится на минимальном ограничении. Поэтому возрастет суммарная генерация в линиях передач и батареях конденсаторов $\Delta Q_{\text{сб.к}} > 0$; возрастут потери реактивной мощности $\Delta Q_{\text{спот}} < 0$.

Кроме того, как правило, будут выполняться неравенства $|\Delta Q_{\text{сб.к}}| < |\Delta Q_{\text{вскрм}}|$; $|\Delta Q_{\text{спот}}| < |\Delta Q_{\text{вскрм}}|$.

Так как в уравнение баланса мощностей $\Delta Q_{\text{сб.к}}$ и $\Delta Q_{\text{спот}}$ входят с разными знаками, то их сумма будет существенно меньше, чем $\Delta Q_{\text{вскрм}}$. Следовательно, (14) можно записать в виде

$$\Delta Q_{\text{вскрм}} + \beta \Delta Q_{\text{вскрм}} + \Delta Q_{\text{скрм}} + \Delta Q_{\text{спер}} = 0, \quad (18)$$

где $|\beta| < 1$.

В режимах с нагрузками ниже номинальных ($\beta > 0$) $\Delta Q_{\text{сб.к}} + \Delta Q_{\text{спот}} > 0$; в режимах с нагрузками выше номинальных ($\beta < 0$) $\Delta Q_{\text{сб.к}} + \Delta Q_{\text{спот}} < 0$.

Возмущенный режим в упрощенной РС (с учётом (20) и (21)) удовлетворяет системе уравнений:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_1(U_1^v) + \mathbf{S}_1(U_1^v) + \mathbf{S}_{12}(U_1^v, U_2^v) &= \tau \mathbf{V}; \\ \mathbf{S}_{12}(U_1^v, U_2^v) + \mathbf{F}_2(U_2^v) + \mathbf{S}_2(U_2^v) + \mathbf{S}_{23}(U_2^v, U_3^v) &= 0; \\ \mathbf{S}_{23}(U_2^v, U_3^v) + \mathbf{F}_3(U_3^v) + \mathbf{S}_3(U_3^v) + \mathbf{S}_{34}(U_3^v, U_4^v) &= 0; \\ \dots & \\ \mathbf{S}_{k,k-1}(U_{k-1}^v, U_k^v) + \mathbf{F}_k(U_k^v) + \mathbf{S}_1(U_k^v) + & \dots \\ + \mathbf{S}_{k,k+1}(U_k^v, U_{k+1}^v) &= 0. \end{aligned} \quad (22)$$

Здесь $\mathbf{S}_{k,k+1}(U_k^v, U_{k+1}^v) = \mathbf{S}_{k,k+1}(U_k^0, U_{k+1}^0) = \text{const}$.

Последнее условие обеспечивает сохранение параметров базового УР для общих узлов исходной и упрощенной РС.

В общем случае решения систем (20) и (22) с одинаковым возмущением \mathbf{V} не совпадут: $U_j \neq U_j^v$ ($j = 1, 2, \dots, k$). Так как согласно методике формирования упрощенной РС контролируемые узлы принадлежат 1-му ярусу, под погрешностью за счет упрощения будем понимать норму разности решений для узлов 1-го яруса:

$$\Theta_u = \|U_1 - U_1^v\|.$$

Если в (22) значения $\mathbf{S}_{k,k+1}(U_k^0, U_{k+1}^0)$ заменить на значение перетоков $\mathbf{S}_{k,k+1}(U_k, U_{k+1})$ в возмущенном режиме полной РС, то ее решение для общих узлов совпало бы с решением системы (20). Следовательно, погрешность от упрощения определяется разностью перетоков по ветвям между узлами k -го и $(k+1)$ -го ярусов в базовом и возмущенном режимах, вычисляемых в полной РС.

Целью расчетов является вычисление производных посредством решения уравнений УР с малыми возмущениями. Следовательно, погрешности решений можно определять с использованием линеаризованных систем уравнений.

В [11] показано, что методика упрощения позволяет сформировать такую упрощенную РС, возмущенные режимы которой будут сколь угодно близкими к таким же режимам в полной РС. Предположим, что упрощенная РС позволяет вычислять с достаточной точностью возмущенные УР и возмущение достаточно мало для того, чтобы при вычислении УР в полной и упрощенной РС можно было бы воспользоваться системой уравнений, линеаризованной в окрестности базового режима. Пусть для любых значений V и U из области (2) су-

ществует такой интервал $0 \leq \tau \leq \tau_M$, что системы (20) и (22) имеют непрерывные по τ решения для всех τ из этого интервала, причем базовый режим соответствует $\tau=0$ и возмущенный — $\tau \neq 0$.

Выполнение этих условий позволяет рассматривать отношения $\Delta U_1(\tau \Delta v_i) / \tau \Delta v_i$, в которые входят решения линеаризованных систем $\Delta U_1(\tau \Delta v_i)$ как приближенные значения производных, а точные — как пределы этих отношений при $\tau \rightarrow 0$: $dU_1 / dv_i = \lim_{\tau \rightarrow 0} \Delta U_1(\tau \Delta v_i) / \tau \Delta v_i$.

Линеаризуем систему уравнений (20) относительно приращений $\Delta U_i'$, $\Delta U_i''$ в базовом режиме, сохранив составляющие $\Delta|U_i|$. При этом перетоки по всем ветвям, в том числе и между узлами k -го и $(k+1)$ -го ярусов, в базовом режиме равны:

$$\begin{aligned} \Delta P_{ij} &= 2y' |U_i| \Delta|U_i| + a_{1p} \Delta U_i' + a_{2p} \Delta U_i'' + \\ &+ b_{1p} \Delta U_j' + b_{2p} \Delta U_j''; \\ \Delta Q_{ij} &= 2y'' |U_i| \Delta|U_i| + a_{1q} \Delta U_i' + a_{2q} \Delta U_i'' + \\ &+ b_{1q} \Delta U_j' + b_{2q} \Delta U_j'', \end{aligned} \quad (23)$$

где y' и y'' — действительная и мнимая составляющие проводимости ветви.

Далее в линеаризованной системе, используя соотношения

$$\begin{aligned} \Delta U_i' &= (U_i' / |U_i|) \Delta|U_i| - U_i'' \Delta \delta_i; \\ \Delta U_i'' &= (U_i'' / |U_i|) \Delta|U_i| - U_i' \Delta \delta_i, \end{aligned} \quad (23a)$$

перейдем к переменным $\Delta|U_i|$, $\Delta \delta_i$ (изменениям модуля вектора напряжения и его угла относительно шин неизменного напряжения).

Если для узлов, образующих ярусы, под векторами $\Delta U_1, \dots, \Delta U_m$ понимать векторы с координатами из переменных $\Delta|U_i|$, $\Delta \delta_i$, то система линеаризованных уравнений полной РС для режима с возмущением $\tau \mathbf{V}$ примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{11} \Delta U_1 + \mathbf{A}_{12} \Delta U_2 &= \tau \mathbf{V}; \\ \mathbf{A}_{21} \Delta U_1 + \mathbf{A}_{22} \Delta U_2 + \mathbf{A}_{23} \Delta U_3 &= 0; \\ \dots & \\ \mathbf{A}_{(k-1),k} \Delta U_{k-1} + \mathbf{A}_{k,k} \Delta U_k + \mathbf{A}_{k,(k+1)} \Delta U_{k+1} &= 0; \\ \dots & \\ \mathbf{A}_{(m-1),m} \Delta U_{m-1} + \mathbf{A}_{m,m} \Delta U_m &= 0. \end{aligned} \quad (24)$$

Это означает, что ΔU_k и ΔU_{k+1} являются линейными функциями возмущения. Введем для них обозначения: $\Delta U_k = C_{k,1} \tau \mathbf{V}$; $\Delta U_{k+1} = C_{(k+1),1} \tau \mathbf{V}$.

Из (23) и (24) при малых $\tau \mathbf{V}$ следует линейность зависимости разностей перетоков по ветвям между узлами k -го и $(k+1)$ -го ярусов от возмущения:

$$\Delta \mathbf{S}_{k,k+1} = \mathbf{A}_{k,k,s} \Delta U_k + \mathbf{A}_{k,k+1} \Delta U_{k+1} = -\mathbf{G}_{k,k+1} \tau \mathbf{V}, \quad (25)$$

где $\mathbf{G}_{k,k+1}$ — матрица порядка $2n_k \times r$ (n_k — число граничных узлов; r — число настраиваемых уставок СКРМ); $\mathbf{A}_{k,k} = \mathbf{A}_{k,k,S} + \mathbf{A}_{k,k,F}$; $\mathbf{A}_{k,k,S}$ и $\mathbf{A}_{k,k,F}$ — матрицы производных от функций $\mathbf{S}(.,.)$ и $\mathbf{F}(.,.)$ в уравнениях (20) с учётом преобразования (23а).

Поясним структуру матрицы $\mathbf{G}_{k,k+1}$ на примере системы с двумя настраиваемыми уставками. Матрица имеет квазидиагональную блочную структуру. В ней каждому j -му граничному узлу соответствует блок

$$g_{k,k+1}^\tau = \begin{vmatrix} dP_j / dV_1 & dP_j / dV_2 \\ dQ_j / dV_1 & dQ_j / dV_2 \end{vmatrix} \quad (26)$$

из производных по уставкам V_1 и V_2 от сумм перетоков (с активной P_j и реактивной Q_j составляющими) по ветвям, связанным с j -м граничным узлом.

Если при вычислении реакций на возмущение $\tau\mathbf{V}$ базового режима полную РС заменить упрощенной РС с учетом зависимости (25), соответствующая ей система уравнений примет вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{11}\Delta\mathbf{U}_1 + \mathbf{A}_{12}\Delta\mathbf{U}_2 &= \tau\mathbf{V}; \\ \mathbf{A}_{21}\Delta\mathbf{U}_1 + \mathbf{A}_{22}\Delta\mathbf{U}_2 + \mathbf{A}_{23}\Delta\mathbf{U}_3 &= 0; \\ \dots & \\ \mathbf{A}_{(k-1),k}\Delta\mathbf{U}_{k-1} + \mathbf{A}_{k,k,F}\Delta\mathbf{U}_k &= \mathbf{G}_{k,k+1}\tau\mathbf{V}. \end{aligned} \quad (27)$$

Очевидно, что ее решения совпадут с решениями для полной системы. Следовательно, линейная составляющая погрешности от упрощения ΔU_1^p в базовом режиме определяется как решение системы уравнений:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{11}\Delta U_1^p + \mathbf{A}_{12}\Delta U_2^p &= \tau\mathbf{V}; \\ \mathbf{A}_{21}\Delta U_1^p + \mathbf{A}_{22}\Delta U_2^p + \mathbf{A}_{23}\Delta U_3^p &= 0; \\ \dots & \\ \mathbf{A}_{(k-1),k}\Delta U_{k-1}^p + \mathbf{A}_{k,k,F}\Delta U_k^p &= \mathbf{G}_{k,k+1}\tau\mathbf{V}. \end{aligned}$$

Учитывая полученные качественные оценки погрешности от упрощения (24), можно утверждать, что при увеличении числа ярусов в упрощенной расчетной схеме изменения перетоков в возмущенном режиме по ветвям между узлами k -го и $(k+1)$ -го ярусов убывают. Вслед за этим будут уменьшаться нормы матриц $\mathbf{C}_{k,1}$, $\mathbf{C}_{k+1,1}$ и $\mathbf{G}_{k,k+1}$ и погрешность от упрощения.

Рассмотрим возможность снижения погрешности вычисления производных при решении задачи в работающей системе управления.

Отношения $\Delta U_1^v / \tau\Delta v_j$ для текущего режима (в предположении постоянства граничных перетоков) определяются из решений системы уравнений, от-

личающейся от соответствующей полной подсистемы (24) правой частью $\mathbf{G}_{k,k+1}\tau\mathbf{V}$ для узлов k -го яруса.

Покажем, что в рассматриваемых условиях для решения задачи можно воспользоваться системой уравнений (27) и вычислять производные без методической погрешности.

Элементы матрицы $\mathbf{G}_{k,k+1}$ являются производными по уставкам регуляторов напряжения от перетоков по граничным ветвям (26). Работа системы управления в тактовом режиме позволяет выбрать последовательность состояний, в которой первым является ввод управления и следующим — идентификация УР. Сравнивая измеряемые системой «Оценивание состояния» перетоки по граничным ветвям, можно сформировать систему линейных уравнений, из которой определяются значения элементов матрицы $\mathbf{G}_{k,k+1}$. Число таких замеров должно быть не меньше, чем число управляемых СКРМ.

Рассмотрим пример с двумя СКРМ. Предположим, что первый и второй типы управления состояли соответственно в изменении уставок на $\mathbf{V}_1 = (\Delta V_{11}, \Delta V_{21})$ и $\mathbf{V}_2 = (\Delta V_{12}, \Delta V_{22})$, при этом перетоки по граничным ветвям, связанным с i -м узлом, изменились соответственно на

$$\begin{aligned} \Delta S_{i1} &= s_{i1}\Delta V_{11} + s_{i2}\Delta V_{21}; \\ \Delta S_{i2} &= s_{i1}\Delta V_{12} + s_{i2}\Delta V_{22}, \end{aligned} \quad (28)$$

где $S_{i1} = \Delta P_{i1} + j\Delta Q_{i1}$, $\Delta S_{i2} = \Delta P_{i2} + j\Delta Q_{i2}$; s_{i1} , s_{i2} — комплексные числа — производные от перетоков мощности по уставкам, связанные с элементами матрицы соотношениями:

$$\begin{aligned} s_{i1} &= dP_j / dv_1 + jdQ_j / dv_1; \\ s_{i2} &= dP_j / dv_2 + jdQ_j / dv_2. \end{aligned}$$

Система уравнений (28) в случае невырожденности, т.е. $\Delta V_{11}\Delta V_{22} - \Delta V_{21}\Delta V_{12} \neq 0$, позволяет найти все элементы матрицы $\mathbf{G}_{k,k+1}$ для каждого текущего режима.

В этом случае для вычисления производных можно воспользоваться системой уравнений (27), которая позволяет решать эту задачу без методической погрешности.

Таким образом, с использованием адаптивных моделей электрических систем, построенных по упрощенным расчетным схемам на основе ярусного эквивалентирования и областей существенного влияния СКРМ, выбор уставок регулирования компенсирующих и других регулирующих устройств можно осуществлять с минимальной погрешностью.

Применение адаптивных моделей с ограниченным числом контролируемых узлов не требует

большого объема информации и каналов ее передачи, упрощает построение систем оценивания состояния.

В процессе развития данного направления необходимо разработать критерии и алгоритмы согласованного управления уставками регуляторов напряжения СКРМ, а также программу их реализации в режиме «on-line» для оптимального управления режимами работы энергосистемы.

Приложение 1. На примере расчетной схемы Московской энергосистемы, содержащей 1259 узлов и 1618 ветвей, а также ее упрощенных схем из 6, 7, 8, 9 ярусов в таблице приведены результаты расчетов значений реактивных мощностей Q , их изменений ΔQ (Мвар) и значений коэффициента Θ при изменении напряжения уставки регулирования СК на 0,5 кВ. Это приводит к увеличению выдачи реактивной мощности СК на $\Delta Q_{СК} = 20,7$ Мвар во всех рассмотренных РС ($Q_{СК} = 34,3$ Мвар).

Приложение 2. Для иллюстрации алгоритмов управления источниками реактивной мощности с адаптивной моделью приведен пример расчета уставки регулятора напряжения для компенсатора в узле D энергосистемы из условия поддержания неизменного напряжения в контролируемом узле H при изменении режима сети, например, при переходе от максимального режима к минимальному.

Необходимо, пользуясь упрощенной РС, сформированной для режима зимнего максимума для расчетов УР, вычислить значения уставки напряжения в режиме летнего минимума из условия сохранения значения напряжения зимнего режима в узле H .

Полная расчётная схема состоит из 1259 узлов, 1618 ветвей. Компенсатор в узле D представлен моделью PU ; -100 Мвар; $< Q < 100$ Мвар; $U_D \approx 12$ кВ. В исходном режиме $U_D = 11$ кВ, $Q = 14$ Мвар. Узел H – нагрузочный, представлен моделью PQ . В исходном (зимнем) режиме $U_H = 112,7$ кВ.

Летний режим получен при снижении нагрузок и генерации примерно на 30%. Если напряжение на шинах компенсатора не изменяется ($U_D = 11$ кВ), то напряжение в узле H возрастет до 120,37 кВ. Увеличение составит $\Delta U_D = 7,67$ кВ.

При решении задачи должна использоваться адаптивная модель, состоящая из упрощенной РС и таблиц производных напряжений контролируемых узлов по напряжению на шинах компенсатора, сформированная для исходного режима.

Упрощенная РС сформирована для режима зимнего максимума с помощью программы «Ярусного эквивалентирования». Она содержит 7 ярусов, 347 узлов и 390 ветвей.

Приближенные значения производных в полной и упрощенной РС вычисляются как отношения изменений модулей напряжений в узлах D и H , полученные по результатам расчета УР с возмущением $\Delta U_D = 0,5$ кВ.

В полной РС производная равна $[(\Delta U_H)/(\Delta U_D)]_0 = 2,2$; в упрощенной РС $[(\Delta U_H)/(\Delta U_D)]_0 = 3,436$, т.е. отличается в $3,436/2,2 = 1,56$ раза.

Предполагая зависимости линейными и слабо зависящими от режима и решая уравнение $[(\Delta U_H)/(\Delta U_D)]_0(\Delta U_D) = -7,67$ кВ, получим изменение напряжения в узле D :

$$\Delta U_D = (-7,67/3,44) = -2,24 \text{ кВ.}$$

Далее на адаптивной модели вычисляется установившийся режим, соответствующий летнему режиму, с напряжением в узле D , равным

$$U_D = 11 - 2,24 = 8,76 \text{ кВ.}$$

Напряжение в узле H понизилось до значения 112,8 кВ. Полученный результат вполне удовлетворительный.

Напряжение в узле для полной схемы летнего режима определяется с учётом приведённого ранее отношения производных для полной и упрощен-

Расчетная схема	Число		$Q_{Г}$	$\Delta Q_{Г}$	Q_{H}	$Q_{Тр}$	$\Delta Q_{H}, \Delta Q_{Тр}$	$Q_b - Q_x$	$\frac{\Delta Q_b}{(\Delta Q_x)}$	$Q_{пер}$	$\Theta, \%$
	узлов	ветвей									
Исходная	1259	1618	5863	-25,1	6800,4	2387	0,5	-3295	-4,9	0	0
6 ярусов	140	159	14165	-10,0	1135,4	458,2	2,0	-142,8	-2,8	11,4	55,0
7 ярусов	230	258	2224,6	-14,9	1783,3	781,9	1,26	-306,3	-3,0	7,5	37,2
8 ярусов	349	396	2414,2	-15,7	2708,8	953,0	1,1	-1213,2	-3,5	7,2	34,8
9 ярусов	523	613	3472,6	-18,9	4227,4	1411,4	0,98	-2132	-4,2	4,9	23,7

Обозначение параметров: $Q_{Г}$, $\Delta Q_{Г}$ – реактивная мощность и ее изменение; Q_{H} – суммарная реактивная мощность нагрузок; $Q_{Тр}$ – индуктивные потери в трансформаторах; ΔQ_{H} , $\Delta Q_{Тр}$ – изменение индуктивной мощности нагрузок и трансформаторов; Q_b – реактивная мощность генерации линий; Q_x – индуктивные потери в линиях; ΔQ_b , ΔQ_x – изменение реактивных потерь от емкостной проводимости линии и индуктивных потерь в сопротивлениях линии X ; $Q_{пер}$ – изменение перетоков по граничным связям; Θ – приближенная погрешность упрощенной расчетной схемы.

ных РС исходного режима – 1,56. Изменение напряжения на шинах компенсатора и, соответственно, уставки в полной схеме составит:

$$(\Delta U_D) = 1,56(-2,24) = -3,49 \text{ кВ.}$$

Следовательно, значение напряжения в узле D или уставки компенсатора должно быть равным $U_D = 11 - 3,49 = 7,51 \text{ кВ.}$

В результате расчета УР для полной схемы с этим значением уставки напряжения компенсатора получается напряжение в узле H 112,82кВ, что близко к заданному значению 112,7 кВ. Компенсатор будет работать в режиме потребления реактивной мощности $Q_D \approx -100 \text{ Мвар.}$

Выводы. 1. Эффективность применения источников реактивной мощности в энергосистемах в условиях ограниченности информации о текущих режимах энергосистемы может быть значительно повышена при их оснащении системами управления с адаптивными моделями.

2. Основой адаптивных моделей могут служить упрощенные расчетные схемы, полученные по методике ярусного эквивалентирования, использующей локальность действия источников реактивной мощности в энергосистеме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Руководящие** указания по применению средств компенсации реактивной мощности и регулируемых трансформаторов в электрических сетях 110-1150 кВ. – М.: ЭНЕРГОСЕТЬПРО-ЕКТ, ВНИИЭ, согласовано РАО «ЕЭС России», 1994.
2. **Кочкин В.И., Нечаев О.П.** Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2000.
3. **Гамм А.З., Глазунов А.М., Гришин Ю.А. и др.** Развитие алгоритмов оценивания состояния электроэнергетической системы. – Электричество, 2009, № 6.
4. **Аюев Б.И., Куликов Ю.А.** Перспективные направления системы мониторинга переходных режимов ЕЭС/ОЭС. – Proc. of the Inter.Conf. «Reley Protection and Substation Automatic of Modern Power Systems»: energoinfo.ru/images/pdf/tele/session_4/s4-2.pdf
5. **Крумм Л.А.** Методы приведенного градиента при управлении электроэнергетическими системами. – Новосибирск: Наука, 1977.
6. **Баринов В.А., Совалов С.А.** Режимы энергосистем: методы анализа и управления. – М.: Энергоиздат, 1990.
7. **Макаровский С.Н., Хвошинская З.Г.** Проблемы управления напряжением и реактивной мощностью в основных сетях ЭЭС России. – Энергетик, 2002, № 6.
8. **Горожанкин П.А., Майоров А.В., Макаровский С.И., Рубцов А.А.** Управление напряжением и реактивной мощностью в электроэнергетических системах. Европейский опыт. – Электрические станции, 2008, № 6.
9. **Фельдбаум А.А.** О применении вычислительных устройств в автоматических системах. – Автоматика и телемеханика, 1956, № 11.
10. **Моисеев Н.Н.** Элементы теории оптимальных систем. – М.: Наука, 1974.
11. **Фролов В.И.** Упрощение схем электрических сетей энергосистем для расчетов установившихся режимов с локальными возмущениями. – Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1991, № 4.
12. **Гончарюк Н.В., Фролов В.И.** Методические и программные средства формирования расчетных схем объединенных энергосистем на базе современных технологий. – Электричество, 2003, № 5.
13. **Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М.** Чувствительность систем управления. – М.: Наука, 1981.
14. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1985.
15. **Дмитренко Е.М., Морозов И.В., Фролов В.И.** О методике формирования расчетной схемы электрической сети Мосэнерго с контролируемой погрешностью. – Электрические станции, 2004, №5.

[18.10.10]

Авторы: Гвоздев Дмитрий Борисович закончил факультет электроснабжения Кузбасского государственного технического университета в 1996 г. В 2000 г. там же защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Электротехнические комплексы и системы, включая их управление и регулирование. Заместитель председателя правления ОАО «ФСК ЕЭС», главный инженер.

Илюшин Павел Владимирович закончил факультет энергетики Новосибирского государственного технического университета в 1997 г. Зам. начальника Департамента по организации эксплуатации и ТОиР ОАО «Холдинг МРСК».

Кочкин Валерий Иванович закончил электроэнергетический факультет (ЭЭФ) Московского энергетического института (МЭИ) в 1962 г. В 1993 г. защитил в МЭИ докторскую диссертацию «Многофункциональные вентильные компенсаторы реактивной мощности для управления режимами работы энергосистем». Зам. научного руководителя ОАО «НТЦ электроэнергетики».

Фокин Владимир Константинович закончил ЭЭФ МЭИ в 1970 г. В 1980 г. защитил во ВНИИЭ кандидатскую диссертацию «Повышение устойчивости электропередач и узлов нагрузки энергосистем путем регулирования возбуждения синхронных машин по двум осям». Заведующий лабораторией моделирования, измерения и применения регулирующих устройств в электрических сетях ОАО «НТЦ электроэнергетики».

Фролов Вячеслав Иванович закончил факультет «Тепловые и гидравлические машины» Московского высшего технического училища им. Баумана в 1959 г. и Механико-математический факультет Московского государственного университета им. Ломоносова в 1969 г. В 1976 г. защитил кандидатскую диссертацию «Применение теории аналитических оператор-функций для исследования устойчивости и качества одного класса сложных автоматически регулируемых систем» в Ленинградском политехническом

*институте. Ведущий научный сотрудник ОАО «НТЦ
электроэнергетики».*