

УПРАВЛЕНИЕ АКТИВНО-АДАПТИВНОЙ СЕТЬЮ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТОКОВ МОЩНОСТИ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ*

АВТОРЫ:

БЕЛЯЕВ Н.А.
ФГБОУ ВПО «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

КОРОВКИН Н.В.
ФГБОУ ВПО «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФРОЛОВ О.В.
ОАО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»

ЧУДНЫЙ В.С.
ОАО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»

Центральный пульт управления сетями ОАО «Ленэнерго»

Современное развитие электроэнергетических систем (ЭЭС) характеризуется непрерывным ростом потребления электрической энергии и мощности, строительством новых электростанций и электросетевых объектов, присоединением новых потребителей [1]. Все это существенно усложняет конфигурацию ЭЭС и ведет к снижению управляемости ЭЭС. Рост потребления электроэнергии уве-

личивает нагрузку на электрические сети, что означает не только увеличение потерь и рост эксплуатационных издержек, но и снижение надежности и качества электроснабжения вследствие неоптимальных режимов работы и систематических перегрузок сетевого оборудования. Решение всех этих проблем возможно с помощью новых, эффективных методов управления потоками мощности в ЭЭС.

*Статья написана по материалам доклада, представленного Беляевым Н.А. на конференции молодых ученых «Энергия единой сети» (22 июня 2013, г. Санкт-Петербург). Конкурсной комиссией доклад был отмечен первой премией по тематике «Управление большими потоками мощности. Силовая электроника».



Эффективное управление потоками мощности позволяет оптимизировать как установившиеся режимы работы ЭЭС, так и восстановление ЭЭС после аварий. Появление гибких систем передачи электроэнергии (концепция FACTS) открывает новые возможности управления потоками мощностей и режимами работы ЭЭС [2]. Внедрение элементов гибких систем передачи электроэнергии, позволяющих в широких пределах изменять параметры передающих линий и нагрузок, превращает электрические сети из пассивных систем транспорта электроэнергии в активно-адаптивные системы, которые обеспечивают управление ЭЭС и качественно иной уровень функционирования. Это обусловило появление проектов создания интеллектуальных энергосистем (ИЭС) с активно-адаптивной сетью (ААС). Следует, однако, заметить, что наличие большого числа управляющих (активных) элементов ААС требует разработки соответствующих методов управления, которые смогли обеспечить максимально эффективную работу всех элементов ИЭС.

В настоящей статье излагаются результаты разработки нового перспективного метода управления потоками мощности в ИЭС с ААС. Метод основан на применении специального математического аппарата для определения влияния управляющих элементов ААС на режимы работы ЭЭС. Метод позволяет также определять зоны влияния управляющих элементов и выполнять кластеризацию сети, что необходимо для анализа режимов работы ИЭС.

Структура статьи следующая. Вначале обсуждается предлагаемый метод определения зависимости параметров режима ЭЭС от характеристик управляющих элементов ААС, описываются их основные свойства. Затем вводится понятие зон влияния управляющих элементов и определяются их характеристики на при-

мере перспективной схемы ЭЭС Санкт-Петербурга и Ленинградской области (ЭЭС СПб. и ЛО), рассматриваемой как ИЭС с ААС. Полученные результаты используются далее для постановки задачи кластеризации сети и определения способов ее решения. В заключение описываются результаты апробации разрабатываемого метода: решение задачи минимизации потерь и поиска наилучших мест установки управляемых устройств компенсации реактивной мощности – элементов ААС в ЭЭС СПб. и ЛО.

1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ АКТИВНО-АДАПТИВНОЙ СЕТИ НА РЕЖИМ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

ИЭС с ААС характеризуется большим количеством управляющих элементов (далее – элементы ААС), регулирование параметров которых оказывает существенное влияние на распределение потоков мощностей в сети и значения других характеристик режима. Это предоставляет широкие возможности оптимизации режимов ЭЭС с использованием элементов ААС. Однако для разработки алгоритмов управления элементами ААС требуется соответствующий математический аппарат, который позволил бы эффективно определять оптимальные значения всех параметров элементов ААС в соответствии с заданными критериями оптимальности режима ЭЭС.

Для определения оптимальных значений параметров элементов ААС разработан новый подход, описы-

ИНФОРМАЦИЯ

МЕТОД УЗЛОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ (ПОТЕНЦИАЛОВ)

Метод узловых напряжений позволяет проводить количественный анализ сложных разветвленных электрических сетей (цепей). Независимыми переменными в данном методе являются напряжения узлов сети, значения которых определяются относительно некоего базисного (опорного) узла. Эти величины называют узловыми напряжениями. В качестве базисного узла обычно выбирается заземленный узел или узел, в котором сходится наибольшее число ветвей. Если принять потенциал базисного узла равным нулю, то узловые напряжения будут равны потенциалам соответствующих узлов. Поэтому метод называют также методом узловых потенциалов.

Соответствующая система линейных алгебраических уравнений использует только первый закон Кирхгофа. Поэтому анализируемая цепь может содержать только независимые источники тока. Если в схеме имеются источники напряжения, они должны быть заменены эквивалентными источниками тока.

СТРУКТУРА МАТРИЦЫ ВЗАИМНЫХ ВЛИЯНИЙ УЗЛОВ

		Узлы ЭЭС ($U_i = var$)					
		1	2	...	i	...	696
Узел с шунтом $b_j = var$	1	$k_{1,1}$	$k_{1,2}$	...	$k_{1,i}$	...	$k_{1,696}$
	2	$k_{2,1}$	$k_{2,2}$	...	$k_{2,i}$	...	$k_{2,696}$

	j	$k_{j,1}$	$k_{j,2}$	...	$k_{j,i}$	...	$k_{j,696}$

	696	$k_{696,1}$	$k_{696,2}$	...	$k_{696,i}$	...	$k_{696,696}$

Рис. 1

вающий влияние работы элементов ААС на режим ЭЭС. Данный подход основан на широко используемом для расчета установившихся режимов ЭЭС методе узловых напряжений и билинейной теореме [3]. С помощью обобщений билинейной теоремы получены зависимости параметров режима ЭЭС от регулируемых параметров элементов ААС. Эти зависимости представляют собой дробно-полиномиальные функции.

В случае присутствия в ЭЭС какого-либо элемента ААС с регулируемой проводимостью (управляемый шунтирующий реактор, статический тиристорный компенсатор и др.) зависимость узловых напряжений от регулируемой проводимости имеет вид для i -го узла:

$$\dot{U}_i = \frac{A_{0,i}^j + A_{1,i}^j \cdot Y_{var}}{1 + C^j \cdot Y_{var}}, \quad (1)$$

где \dot{U}_i – комплексное значение напряжения в узле i ; Y_{var} – значение регулируемой проводимости (параметра элемента ААС в узле j), $A_{0,i}^j, A_{1,i}^j, C^j$ – не зависящие от Y_{var} комплексные константы, подлежащие определению.

При наличии в ЭЭС элемента ААС с регулируемым сопротивлением X_{var} (например, управляемое устрой-

во продольной компенсации) зависимость для напряжений будет аналогичной:

$$\dot{U}_i = \frac{A_{0,i}^{j,k} + A_{1,i}^{j,k} \cdot X_{var}}{1 + C^{j,k} \cdot X_{var}}, \quad (2)$$

где j, k – узлы, между которыми включено регулируемое сопротивление; $A_{0,i}^{j,k}, A_{1,i}^{j,k}, C^{j,k}$ – также комплексные константы.

Зависимость напряжений от параметра элемента ААС – фазоворотного устройства, мнимой части коэффициента трансформации κ_{var}^{lm} – определяется в соответствии с выражением:

$$\dot{U}_i = \frac{\alpha_{0,i}^{j,k} + \alpha_{1,i}^{j,k} \cdot \kappa_{var}^{lm} + \alpha_{2,i}^{j,k} \cdot (\kappa_{var}^{lm})^2}{1 + \beta^{j,k} \cdot (\kappa_{var}^{lm})^2}, \quad (3)$$

где j, k – узлы, между которыми включено фазоворотное устройство; $\alpha_{0,i}^{j,k}, \alpha_{1,i}^{j,k}, \alpha_{2,i}^{j,k}, \beta^{j,k}$ – комплексные константы.

Поскольку константы в знаменателе выражений (1) – (3) не зависят от номера i переменной, то для определения всех констант любого из приведенных выше выражений достаточно выполнить два расчета режима. Затем процесс определения констант сводится к решению систем линейных алгебраических уравнений второго порядка.

При наличии в ЭЭС двух и более элементов ААС зависимости (1) – (3) легко обобщаются на случай нескольких регулируемых параметров. При этом в числитель и знаменатель таких зависимостей будут входить слагаемые, содержащие сочетания параметров установленных в сети элементов ААС (Y_{var} и X_{var} не более чем в первой степени, κ_{var}^{lm} не более чем во второй степени). Определение констант данных зависимостей производится путем анализа нескольких частных режимов, что также не представляется сложным.

Выражения (1) – (3) позволяют определить зависимости потоков мощностей и других параметров режима от параметров элементов ААС. Можно показать, что эти зависимости будут также иметь дробно-полиномиальный вид. Например, зависимость для комплексного значения тока \dot{I}_p ветви p от регулируемой проводимости Y_{var} может быть определена как линейная комбинация дробно-полиномиальных зависимостей (1):

$$\dot{I}_p = \frac{\dot{U}_k - \dot{U}_i}{\sqrt{3} \cdot \dot{Z}_p} = \frac{B_{0,p}^j + B_{1,p}^j \cdot Y_{var}}{1 + C^j \cdot Y_{var}}, \quad (4)$$

где $B_{0,p}^j, B_{1,p}^j$ – комплексные константы; \dot{Z}_p – комплексное сопротивление ветви p .



Анализ точности предложенного подхода показал, что использование дробно-полиномиальных зависимостей при расчете параметров режима ЭЭС приводит к появлению погрешности не более 1%, что является приемлемым для рассматриваемых задач. При этом применение дробно-полиномиальных зависимостей может существенно упростить решение ряда обратных задач, связанных с оптимизацией параметров элементов ААС, другого сетевого оборудования или конфигурации ИЭС [4].

Важнейшим преимуществом дробно-полиномиальных функций является возможность встраивания их в целевую функцию, что становится возможным за счет того, что данные зависимости устанавливают прямую связь между любым из параметров режима и варьируемым параметром элемента ААС. Это существенно упрощает вид целевой функции и в ряде случаев позволяет получить строгое аналитическое решение задачи оптимизации. Рассмотрим это важное свойство дробно-полиномиальных функций на примере критерия минимума потерь активной мощности.

Потери активной мощности в ветвях ЭЭС в общем виде определяются выражением:

$$\Delta P = \sum_{p=1}^{p=w} I_p^2 \cdot R_p, \quad (5)$$

где I_p, R_p – действующее значение тока и активное сопротивление ветви p соответственно; w – общее число ветвей в ЭЭС; ΔP – суммарные потери активной мощности в ЭЭС. Пусть в ЭЭС установлен элемент ААС с регулируемым параметром, проводимостью Y_{var} . Тогда с учетом (4) выражение (5) можно записать в виде:

$$\Delta P = \sum_{p=1}^{p=w} \left| \frac{B_{0,p}^j + B_{1,p}^j \cdot Y_{var}}{1 + C^j \cdot Y_{var}} \right|^2 \cdot R_p. \quad (6)$$

Обсудим (6) более подробно. Все слагаемые в данном выражении имеют один и тот же знаменатель, поскольку константа C^j является общей для всех I_p и зависит только от места расположения элемента ААС в сети. Таким образом, знаменатель в (6) может быть вынесен за знак суммы, и выражение (6) сводится к следующему виду:

$$\Delta P = \frac{D_{0,p}^j + D_{1,p}^j \cdot Y_{var} + D_{2,p}^j \cdot Y_{var}^2}{|1 + C^j \cdot Y_{var}|^2}, \quad (7)$$

где $D_{0,p}^j, D_{1,p}^j, D_{2,p}^j$ – не зависящие от Y_{var} константы.

Выражение (7) описывает зависимость потерь активной мощности в сети от параметра элемента Y_{var} . Это выражение имеет всего четыре неизвестные константы, которые могут быть определены по результатам расчетов двух установившихся режимов с различным ненулевым значением Y_{var} . Таким образом, процесс формирования целевой функции существенно упрощается. Кроме того, компактная запись критерия допускает аналитическое решение задачи минимизации (7), что значительно облегчает процесс построения алгоритмов оперативного управления ААУ.

Более подробно результаты исследований дробно-полиномиальных функций и их применения для решения задач оптимизации ЭЭС представлены в [5].

2. ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ АКТИВНО-АДАПТИВНОЙ СЕТИ

Предлагаемый метод определения зависимостей параметров режима от параметров элементов ААС позволяет определять характеристики ААС, соответствующие заданным

критериям оптимальности режима ЭЭС. Однако ИЭС с ААС, как было отмечено, характеризуется большим количеством управляющих элементов. При увеличении числа таких элементов дробно-полиномиальные функции приобретают более сложный вид. Современные вычислительные машины позволяют работать с такими сложными выражениями, поэтому запись на основе дробно-полиномиальных функций и минимизация различных функционалов с успехом могут производиться одновременно для большого числа оптимизируемых параметров элементов ААС. Однако в этом случае определение совместного влияния элементов ААС на режим сети и оптимизацию их параметров можно выполнить более простыми методами, если ввести в рассмотрение зоны влияния элементов ААС. Пусть в заданном узле (или ветви) ЭЭС установлен элемент ААС. Под зоной влияния данного элемента ААС будем понимать энергорайон (т. е. некоторое множество узлов и ветвей), в котором вариации параметра данного элемента от минимального до максимального значения приводят к изменению параметров режима. Другими словами, зона влияния элемента ААС – это часть ЭЭС, в которой данный элемент оказывает воздействие на режим сети. В крупной ЭЭС, имеющей сложную структуру электрической сети, а также большое количество источников активной и реактивной мощности, установленные элементы ААС, как правило, имеют ограниченную зону влияния. Таким образом, учет зависимости от параметра элемента ААС для всех узлов (ветвей) схемы не только приводит к увеличению объемов расчетов и к сложному, громоздкому виду минимизируемого функционала, но и оказывается излишним, поскольку для узлов (ветвей), находящихся за пределами зоны влияния данного элемента ААС, этой зависимости как таковой и не будет. Количество аргументов

МАТРИЦА ВЗАИМНЫХ ВЛИЯНИЙ УЗЛОВ ЭЭС СПБ И ЛО

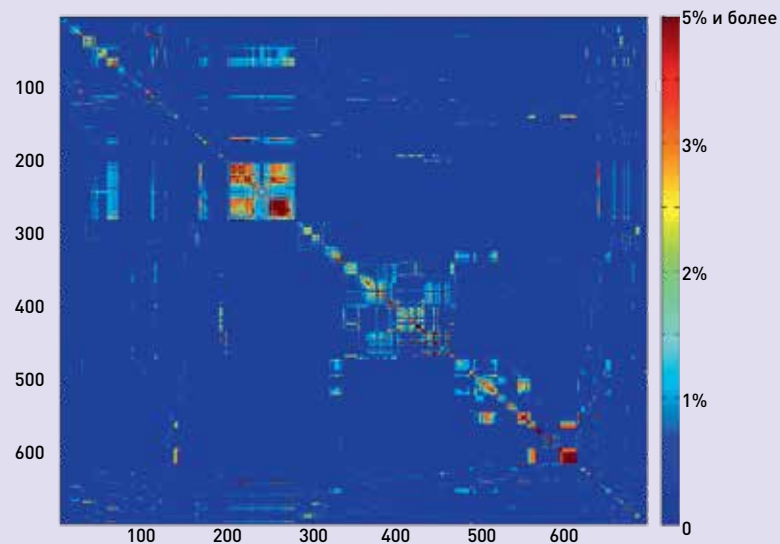


Рис. 2

дробно-полиномиальной функции будет определяться количеством элементов ААС, в зоны влияния которых попадает данный узел (ветвь). Отметим также, что поскольку все параметры режима взаимосвязаны, то размер и расположение зоны влияния для конкретного элемента ААС не зависят от того, какие именно параметры режима рассматриваются в задаче и участвуют в записи целевой функции.

Величина зоны влияния существенно зависит от выбора локализации элементов ААС в ЭЭС. Для исследования свойств зон влияния элементов ААС для ЭЭС Санкт-Петербурга и Ленинградской области была построена матрица взаимных влияний узлов. Структура этой матрицы представлена на рис. 1. Каждая строка и столбец данной матрицы соответствуют определенному узлу ЭЭС, размерность матрицы равна числу узлов ЭЭС (для исследуемой ЭЭС – 696).

Процесс построения матрицы взаимных влияний состоит в следующем. Последовательно в каждый узел ЭЭС устанавливается реактивный шунт переменной величины $b_j = var$ (который, в частности, может моделировать работу элемента ААС соответствующего типа). При этом для всех узлов ЭЭС определяются константы дробно-полиномиальной зависимости. Затем для каждого узла выполняется поиск максимального и минимального значения модуля напряжения, которое можно обеспечить при изменении проводимости шунта в заданных пределах. Здесь используются дробно-полиномиальные зависимости (1), которые позволяют легко найти искомые экстремальные значения аналитическим путем. После чего для каждого i -го узла при каждом j -м расположении шунта производится расчет коэффициентов влияния – элементов матрицы взаимных влияний узлов – в соответствии с выражением:

$$k_{j,i} = \frac{U_{i,max}^j - U_{i,min}^j}{U_{i,ном}} \quad (8)$$

где $U_{i,max}^j, U_{i,min}^j$ – соответственно максимальное и минимальное значения напряжения i -го узла, которые могут быть достигнуты при изменении величины шунта в узле j ; $U_{i,ном}$ – номинальное напряжение i -го узла.

Построенная для исследуемой ЭЭС СПб. и ЛО матрица взаимных влияний узлов показана на рис. 2. Здесь представлена так называемая «раскраска» матриц – цветное изображение, характеризующее числовые значения элементов матрицы. Темно-синим цветом выделены нулевые значения, голубым – значения до 0,02, зеленый соответствует значениям от 0,02 до 0,03, оранжевый – от 0,03 до 0,05, красный – более 0,05 (5%). Проанализировав структуру представленных матриц, можно определить некоторые общие свойства:

1. Полученная матрица имеет большое число нулевых элементов, т.е. является разреженной. Это подтверждает предположение о том, что установленные в сети управляющие элементы (элементы ААС) будут иметь ограниченную зону влияния.
2. Полученная матрица является симметричной, что свидетельствует о выполнении для исследуемой схемы принципа взаимности.
3. Важной особенностью является различное количество ненулевых элементов в различных строках матрицы. Это означает, что совокупная степень влияния у разных узлов различна и зоны влияния элементов ААС зависят от мест их расположения.
4. Ключевой особенностью матриц является наличие в них групп строк с одинаковыми по номерам ненулевыми элементами. Физический смысл таких строк матрицы вза-

МАТРИЦА ВЗАИМНЫХ ВЛИЯНИЙ УЗЛОВ ЭЭС СПБ И ЛО ПОСЛЕ УПОРЯДОЧЕНИЯ УЗЛОВ И ВЫДЕЛЕНИЯ КЛАСТЕРОВ

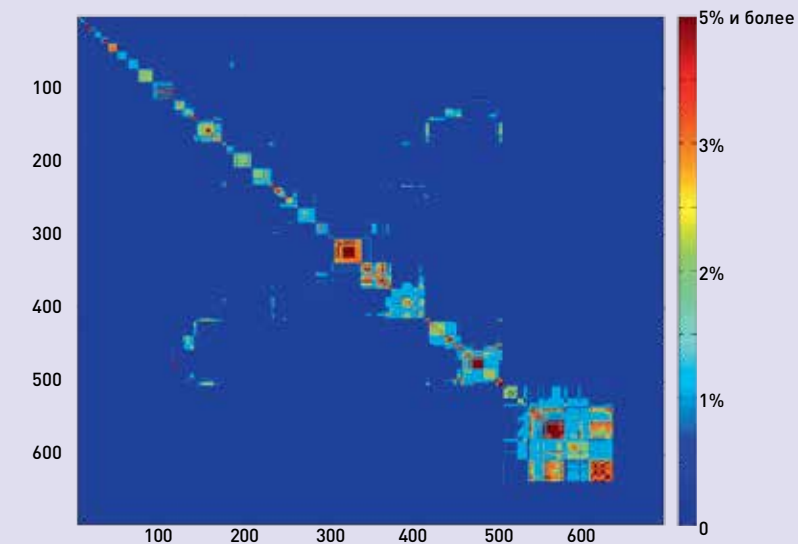


Рис. 3

имных влияний узлов заключается в том, что в рассматриваемой ЭЭС можно выделить группу узлов (порядковые номера которых соответствуют номерам одинаковых строк в матрице), которые имеют влияние друг на друга, но при этом не имеют влияния на остальные узлы ЭЭС. Это крайне важное свойство будет использовано в дальнейшем.

Определение зоны влияния элемента ААС, установленного в узле j , производится посредством определения ненулевых элементов в j -й строке матрицы взаимного влияния. Тогда в зону влияния данного элемента ААС войдут такие узлы i , для которых коэффициент взаимного влияния $k_{j,i}$ больше нуля. При этом с помощью элемента ААС можно будет регулировать потоки мощности и другие параметры режима только внутри его зоны влияния. Изменение параметров элемента ААС не воздействует на режим работы сети вне его зоны влияния.

3. КЛАСТЕРИЗАЦИЯ СЕТИ

Управление потоками мощности с помощью одного элемента ААС возможно только в пределах энергорайона ЭЭС, называемого зоной влияния элемента ААС. Для организации управления такими потоками во всей ЭЭС может потребоваться установка большого числа управляющих элементов, с тем чтобы их зоны влияния покрывали всю сеть. Причем по экономическим соображениям требуемый эффект должен достигаться минимальным числом управляющих элементов, поскольку установка каждого такого устройства требует больших капитальных затрат. Поэтому данному вопросу в работе было уделено особое внимание. Решение этой задачи является далеко не тривиальной проблемой. Во-первых, из всего множества

зон влияния, определенного для всевозможных вариантов расположения элементов ААС, необходимо выделить такой набор, который действительно покрывает всю сеть. Во-вторых, этот набор должен быть по возможности минимальным, то есть покрывать сеть ЭЭС минимальным числом зон влияния. Математическая формулировка задачи может быть записана в виде:

$$\begin{aligned} & \text{Arg}(\Psi_k) \xrightarrow{k} \min \\ & \Psi_k : \psi_{k_1}, \psi_{k_2}, \dots, \psi_{k_n} \in \Psi_k, \\ & \text{если } \{\psi_{k_1} \cup \psi_{k_2} \cup \dots \cup \psi_{k_n}\} = N, \end{aligned} \quad (9)$$

где ψ_{k_n} – множество узлов, входящих в зону влияния элемента ААС, установленного в узле k_n ; ψ_k – некоторый k -й набор зон влияния элементов ААС; N – все множество узлов рассматриваемой ЭЭС. Следует отметить, что определение наилучших вариантов установки элементов ААС не всегда (по величине зоны влияния) дает требуемый результат, по-

скольку установленные в выбранные таким образом узлы элементы ААС могут дублировать зоны влияния друг друга, не обеспечивая при этом покрытия всей сети.

Для решения поставленной задачи воспользуемся некоторыми свойствами зон влияния, которые были перечислены выше. В частности, как было указано, в схеме присутствуют группы узлов, имеющих влияние друг на друга, но не оказывающих воздействия на другие узлы ЭЭС. Фактически это означает, что элемент ААС, установленный в любой из узлов данной группы, будет иметь зону влияния, в которую войдут все узлы данной группы, а остальные узлы ЭЭС останутся вне ее. Такую группу узлов назовем кластером, объединением нескольких однородных элементов, которое может рассматриваться как самостоятельная единица, обладающая определенными свойствами.

Покажем, что кластеризация рассматриваемой ЭЭС и будет являться решением [9]. Каждый кластер ЭЭС будет одновременно являться зоной влияния единственного элемента ААС, установленного в данном кластере. Установка в одном кластере более одного элемента ААС смысла не имеет, поскольку второй элемент ААС в кластере будет иметь ту же зону влияния, что и первый. При этом в одном кластере может находиться несколько элементов ААС разного типа, которые выполняют различные функции. Таким образом, минимальное число элементов ААС, необходимых для покрытия сети, равно числу кластеров в ЭЭС. Разбиение схемы на кластеры также упрощает все дальнейшие расчеты. Например, при вычислении потока мощности в некоторой ветви с помощью дробно-полиномиальной функции достаточно учесть зависимость только от тех элементов ААС, которые находятся в данном кластере. Это существенно упрощает расчеты, поскольку общее число элементов ААС в схеме может достигать нескольких десятков, и дробно-полиномиальные функции от такого количества параметров будут громоздкими. Если даже рассматриваемая ветвь оказалась на границе кластеров, то учет влияния двух элементов ААС также сложности не представляет.

Решая задачу кластеризации в настоящей работе, мы использовали алгоритм минимальной степени [6], который выполняет упорядочение узлов ЭЭС в соответствии со степенью их взаимного влияния. Все узлы ЭЭС оказываются пронумерованы в порядке их включения в различные кластеры. Матрица взаимных влияний узлов для ЭЭС СПб. и ЛО после их упорядочения с использованием алгоритма минимальной степени представлена на рис. 3, где видно, что применение алгоритма минимальной степени свело матрицу взаимных влияний к виду, близкому к блочно-диагональному. Каждый диагональный блок данной

матрицы соответствует группе узлов, имеющих взаимное влияние, то есть одному кластеру. Как видно из рис. 3, идеальной кластеризации добиться не удалось, присутствуют узлы, которые попадают одновременно в несколько кластеров. Однако корректный учет таких узлов в рамках обсуждаемого подхода к определению зависимостей параметров режима от параметров элементов ААС сложности не представляет.

Общее количество кластеров оказалось равным 17. Соответственно, для организации управления потоками мощности во всей ЭЭС необходимо установить как минимум 17 элементов ААС, по одному в каждом кластере. При этом возможна установка и большего числа элементов ААС, если на них будут возложены различные функции. Основным преимуществом предлагаемого метода является возможность организации независимого автономного управления элементами ААС, находящимися в разных кластерах, и, соответственно, независимого управления потоками мощности внутри каждого кластера.

4. ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА И ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ АКТИВНО-АДАПТИВНОЙ СЕТИ

Тестирование предложенных подходов показало эффективность их применения для решения ряда практических задач, в том числе для крупных энергосистем. С их по-

мощью для ЭЭС Санкт-Петербурга и Ленинградской области была решена задача определения наилучших мест установки управляемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности (рассматриваемых как элементы ААС) номинальной мощностью ± 50 МВАр по критерию минимизации потерь активной мощности. Выбранные таким образом места установки рассматриваемых устройств приведены в таблице 1, в которой также указан достигаемый в соответствии с заданным критерием эффект. В первых двух столбцах показаны номера узлов и названия подстанций, на которых рассматривается установка элементов ААС, в третьем столбце приведена величина, на которую снижаются потери в ЭЭС при установке элемента ААС и с учетом оптимального выбора его параметров. Всего было выбрано девять мест установки в 17 кластерах. Это означает, что в девяти кластерах предложено установить рассматриваемые устройства, в остальных восьми их установка по заданному критерию (минимум потерь) не приносит значимого эффекта и является нецелесообразной.

Применение дробно-полиномиальных зависимостей позволило существенно ускорить получение этого решения. Для каждого варианта установки выполнялось всего два расчета режима ЭЭС для определения констант дробно-полиномиальной зависимости мощности потерь от параметра элемента ААС. Затем выполнялся поиск минимума данной зависимости по известным градиентным алгоритмам. Выполненная кластеризация сети также позволила ограничить объем расчетов и выполнить минимизацию потерь для каждого кластера отдельно. Для решения данной задачи классическим методом для каждого варианта установки элемента ААС потребовалось бы выполнить перебор всех возможных значений его

НАИЛУЧШИЕ МЕСТА УСТАНОВКИ СТК ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ПОТЕРЬ

Узел с СТК		Снижение потерь мощности, кВт
№	Название	
53091	ТЭЦ-17	683
1568	Ломоносов №39	634
246	Кингисепп	1003
2260	Манушкино №244	865
1733	Пушкин Южная №185	696
2265	Дубровская ТЭЦ-8	826
1448	Веймарн т.	825
2009	Выборг-Южная	2225
2225	Оккервильская №334	778

Таблица 1

параметра и расчет потерь для каждого из них. Для крупных ЭЭС решение подобных задач методом перебора практически невозможно даже с использованием современных мощных вычислительных машин.

С помощью решения рассмотренной задачи потери мощности в ЭЭС СПб. и ЛО удалось снизить суммарно на 8535 кВт. Этот эффект был достигнут установкой в данной ЭЭС девяти управляемых устройств поперечной компенсации – элементов ААС мощностью по ± 50 МВАр каждое. Полученные результаты были подтверждены контрольными расчетами режимов в специализированном программно-вычислительном комплексе "RastrWin".

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа посвящена исследованию нового подхода к решению задач, связанных с управлением и оптимизацией потоков мощностей в ИЭС с ААС. Данный подход предлагает использование для определе-

ния зависимостей параметров режима ЭЭС от параметров элементов ААС дробно-полиномиальных функций, получаемых с помощью билинейной теоремы.

Применение дробно-полиномиальных зависимостей при определении различных параметров режима не вносит существенных погрешностей в результаты расчетов, однако позволяет существенно их упростить. Особенную эффективность использования таких функций следует ожидать при решении ряда обратных задач, связанных с выбором параметров оборудования ААС или оптимизацией конфигурации ИЭС. Дробно-полиномиальные зависимости применяются для записи требуемых характеристик желаемого режима как функции оптимизируемых параметров. Такой подход сводит проблему определения оптимальных значений параметров к поиску экстремума функции. При этом в критериях оптимальности могут присутствовать любые значения параметров режима или их сочетания.

Для организации управления ААС с большим количеством управляющих элементов мы ввели понятие зон влияния элементов ААС и описали способ их определения. На основе анализа свойств таких зон предложен подход к разбиению ЭЭС на кластеры, внутри которых возможны независимое управление потоками мощности и оптимизация режима ЭЭС. Таким образом, предложен комплексный метод оптимизации режимов работы ИЭС с ААС. Эффективность применения данного метода показана на примере тестовой задачи. Проведенные теоретические исследования позволили формализовать ход решения и получить результаты, существенно уменьшив затраты времени и объемы необходимых расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Схема и программа развития Единой энергетической системы России на период 2013–2019 гг. Проект, 2013.
2. Gyugyi, Laszlo. Understanding FACTS. Concepts and technology of flexible AC transmission systems / Laszlo Gyugyi, Narain G. Hingorani. – New York, 2006. – 353 pp.
3. Гехер К. Теория чувствительности и допусков электронных цепей. – М.: Сов. радио, 2008. – 315 с.
4. Беляев Н.А., Коровкин Н.В., Фролов О.В., Чудный В.С. Использование билинейной теоремы для решения задач оптимизации потоков мощностей в энергосистемах // Электротехнические комплексы и системы управления, 2012, №1. – С. 77–80.
5. Беляев Н.А., Коровкин Н.В., Фролов О.В., Чудный В.С. Исследование методов оптимизации режимов работы энергосистем // Электротехника, 2013, №2. – С. 21–28.
6. Джордж А., Лю Дж. Численное решение больших разреженных систем уравнений. – М.: Мир, 1984. – 334 с.