

УДК 621.311

РЕКОНФИГУРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ И МУЛЬТИАГЕНТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Фишов Александр Георгиевич,

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: fishov@ngs.ru

Мукатов Бекжан Батырович,

главный диспетчер филиала АО «Казахстанская компания по управлению электрическими сетями» Национального диспетчерского центра Системного оператора, Республика Казахстан, 010000, г. Астана, ул. Тауельсиздик, 59. E-mail: mukatov@kegoc.kz

Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения функциональности энергосистем при неизбежном массовом вводе распределенных источников генерации в распределительных сетях, как правило, без централизованного диспетчерского управления, что в целом повышает энергоэффективность производства и распределения энергии, а также приводит к экономии георесурсов.

Цель исследования: разработка метода реконфигурации электроэнергетической системы при мультиагентном управлении для снижения перегрузки электросетевого оборудования, а также для обеспечения живучести энергосистем путем разделения и восстановления электрической сети.

Методы исследования: системный и объектно-ориентированный подходы, математическое моделирование режимов электрических сетей с мультиагентной реконфигурацией.

Результаты. Разработан метод мультиагентной реконфигурации электрической сети, цифровая модель энергосистемы с мультиагентным управлением. Определены принципы построения мультиагентной системы, а также этапы ее работы при реконфигурации сети. Сформулированы общие и частные правила для агентов децентрализованной мультиагентной системы, знание которых, а также режимных параметров только прилегающей к агентам сети достаточно для принятия решения о варианте деления сети. Проведено моделирование реконфигурации сети с распределенной генерацией при мультиагентном управлении на тестовой схеме. Представлены результаты, подтверждающие работоспособность и эффективность метода.

Выводы. Управление в распределительной сети должно быть децентрализованным, на основе мультиагентных технологий, так как в условиях отсутствия наблюдаемости режимов данный подход наиболее эффективен. Проведенные исследования по реконфигурации электроэнергетической системы свидетельствуют о перспективности и работоспособности мультиагентного подхода. Мультиагентный подход позволяет эффективно решить задачу обеспечения функциональности электроэнергетической системы. Предложенная мультиагентная система обладает высокой надежностью и при потере любого из агентов способна адекватно функционировать.

Ключевые слова:

Распределенная генерация, функциональность электроэнергетической системы, живучесть энергосистемы, реконфигурация сети, мультиагентная система, агент, общие и частные правила.

Введение

Рост тарифов на электроэнергию, высокая стоимость технологического присоединения малой генерации к существующим, часто перегруженным, электрическим сетям (ЭС) и большие сроки его реализации, необходимость развития теплоснабжения на обширной территории, а также проблема экономии георесурсов являются предпосылками активного ввода распределенной генерации (РГ) с включением ее на параллельную работу с энергосистемой.

Неизбежность массового развития РГ в распределительных сетях, как правило, не имеющих централизованного диспетчерского управления, обуславливает необходимость создания на их основе качественно новых энергосистем, так называемых Smart Grid.

Концепция Smart Grid подразумевает наличие у электроэнергетических систем (ЭЭС) таких качеств, как высокая способность эффективно проти-

востоять возмущениям, адаптироваться к условиям работ за счет развития современных систем управления [1–4], что, наряду с возможностью участия в регулировании режима и наличием у каждого из субъектов ЭЭС собственных целей, ставит задачу перехода к мультиагентному управлению режимом, в том числе и реконфигурации электрических сетей с распределенной генерацией.

Задачи реконфигурации электроэнергетических систем

ЭЭС являются многофункциональными системами. Качество их работы обобщенно можно характеризовать полнотой выполнения основных функций (функциональностью) (рис. 1).

В ЭЭС с распределенной генерацией ее функциональность во многом определяется способностью системы к сбалансированному разделению и восстановлению целостности системы [5, 6].

Для обеспечения функциональности энергосистемы в зависимости от характера ее снижения реконфигурация сети может решать следующие задачи:

- недопущение и снятие перегрузки элементов сети за счет принудительного потокораспределения;
- обеспечение живучести ЭЭС за счет дезинтеграции и интеграции подсистем;
- обеспечение надежности энергоснабжения как за счет принудительного потокораспределения, так и за счет дезинтеграции и интеграции подсистем.



Рис. 1. Триада основных функций управления ЭЭС

Fig. 1. The triad of basic grid management functions

Реконфигурация ЭЭС с пониженной функциональностью способна восстановить функциональность в полном объеме или повысить ее уровень.

В основной сети ЭЭС реконфигурация может осуществляться централизованно (диспетчерским центром или централизованной противоаварийной автоматикой) в условиях достаточной наблюдаемости сети.

Управление в распределительной сети (РС) должно быть децентрализованным, на основе мультиагентных технологий, так как в РС централизованная реконфигурация невозможна в силу отсутствия (в том числе по причине экономической нецелесообразности) наблюдаемости режимов.

На рис. 2 показаны примеры успешной и возможной неуспешной реконфигурации, в результате которых возможны следующие варианты схемы ЭЭС:

- I – с разделением ЭС на подсистемы, для повышения функциональности ЭЭС по сравнению с исходным значением;
- II – с сохранением целостности ЭС, с принудительным потокораспределением для повышения функциональности ЭЭС;
- III – с разделением ЭС на подсистемы, при снижении функциональности ЭЭС по сравнению с исходным значением (погашение района сети);

- IV – с сохранением целостности ЭС, при снижении функциональности ЭЭС по сравнению с исходным значением (возникновение перегрузки элемента сети), где Φ_0 , Φ – уровни функциональности в исходном режиме и режиме после реконфигурации.

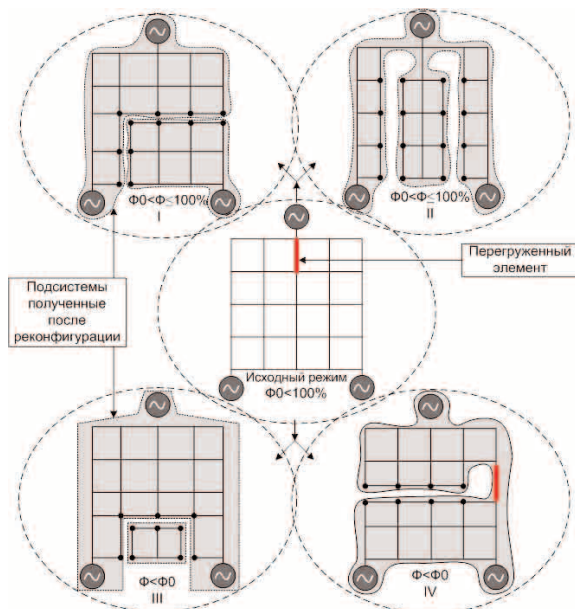


Рис. 2. Возможные варианты реконфигурации ЭЭС с перегруженным элементом

Fig. 2. Possible options for reconfiguration of a grid with an overloaded element

Мультиагентная реконфигурация электроэнергетических систем

Предпосылки. В ряде выполненных работ в данном направлении [7–18] предлагается мультиагентный подход, с использованием агентов, связанных с энергетическими объектами. Необходимо отметить в указанных подходах наличие центрального агента (решатель, сборщик данных, симулятор), выход из строя которого делает неработоспособной всю систему. Это актуализирует разработку МАС без наличия какого-либо координирующего элемента.

Ключевая идея настоящей работы заключается в построении децентрализованной мультиагентной системы, в которой стандартным агентам достаточно знания режимных параметров только прилегающей к ним сети и общих правил для решения мультиагентной системы задачи восстановления функциональности ЭЭС за счет эффективного использования внутренних резервов ЭЭС, возникающих при ее реконфигурации. К этим резервам следует отнести:

- использование регулирующего эффекта нагрузки по частоте и напряжению [19];
- увеличение допустимых перетоков мощности, соответствующих нормативным запасам по устойчивости, которое может быть достигнуто за счет уменьшения нерегулярных колебаний,

путем снижения (вплоть до полного исключения) суммарного потребления в одной из связанных сечением подсистем [20];

- принудительное потокораспределение для снятия перегруза по ЛЭП, за счет загрузки других незагруженных элементов.

Реконфигурация ЭЭС может быть также использована для перекоммутации схемы таким образом, чтобы повышалась живучесть системы при тяжелых системных условиях (например, глубоком снижении частоты в регионе), а также в режимах повышенного риска, когда не выполняется критерий $n-1$.

Терминология мультиагентной системы для последующего описания

Агент – интеллектуальная сущность, представляющая интересы активного узла ЭЭС.

Соседний агент – агент, с узлом которого имеется прямая электрическая связь.

Контролируемый район – зона контроля агентом режима прилегающего района сети по местным параметрам (перетоки по примыкающим к узлу агента линиям электропередачи (ЛЭП) и напряжение в узле).

Инициатор – агент, в контролируемом районе которого произошло снижение функциональности, инициирующий начало работы МАС.

Участник – агент, готовый к действиям (изменению/перераспределению по шинам генерации или потребления) в своем узле, способный повысить функциональность в контролируемом инициатором районе.

Величина нечувствительности – изменение saldo мощности контролируемого района, при котором прекращается дальнейший анализ на наличие снижения функциональности в контролируемом районе.

Действия агента – изменение схемы распределительного устройства (РУ), режима выработки или потребления в узле, прием или передача сообщений.

Запрос – сообщение, направляемое агентом, содержащее информацию о планируемых или реализованных действиях.

Разрешение – сообщение, направляемое агентом в ответ на запрос, содержащее информацию о подтверждении готовности к изменениям.

Отказ – сообщение, направляемое агентом в ответ на запрос, содержащее информацию о недопустимости намечаемых/выполненных действий.

Зона принятия решения – множество агентов, задействованных в процессе мультиагентного управления в соответствии с едиными правилами поведения агентов.

Принципы и правила предлагаемой мультиагентной системы

В основу мультиагентной реконфигурации электрической сети положены контроль режима прилегающего района сети и общие (единые) принципы и базы правил.

Принципы построения мультиагентной системы:

- 1) минимальный обмен информацией между агентами;
- 2) локальность обмена информацией (агенты обмениваются сообщениями только с соседними агентами);
- 3) локальность контроля режима (агент располагает параметрами режима только в контролируемом районе);
- 4) неухудшение функциональности при принятии решения каждым агентом (решение может осуществляться по принципу обратной связи по реакции изменяемой мощности на элементе (ах), приведшем к снижению функциональности у инициатора на действие участника).

Общие и частные правила для агентов

Общие правила:

- Агент, планирующий выполнить действие в контролируемом им районе, сообщает об этом соседним агентам, на связях с которыми произойдут изменения перетоков мощности более величины нечувствительности, или направляет им сообщение о произошедших изменениях.
- Агент выполняет действия после получения от соседних агентов сообщений – «разрешений» на их осуществление, или сохраняет результат уже выполненных действий при отсутствии сообщений – «отказов» от агентов.

Частные правила работы МАС для принудительного потокораспределения:

- При исчерпании возможностей по изменению собственной схемы РУ или режима генерации/потребления в узле инициатор поочередно «просит» помощи у соседних агентов.
- После каждого воздействия работа МАС повторяется (так как меняется потокораспределение в сети).

Частные правила работы МАС при дезинтеграции и интеграции подсистем:

- Отклонение частоты или возникновение перегрузки элементов контролируемого района выявляется всеми агентами данных районов.
- Деление выполняется агентами синхронно.

Взаимодействие агентов для снятия перегрузки. Этапы работы МАС при принудительном потокораспределении:

1. Идентификация снижения функциональности – появление инициатора.
2. Поиск участника и выбор им действия из набора доступных (параллельно по всем направлениям от инициатора).
3. Направление участником соседним агентам запросов для получения разрешения на выполнение намечаемых действий в контролируемом районе или отправка им сообщений о произошедших изменениях.
4. Проверка соседними агентами отсутствия снижения функциональности при намеченных/выполненных действиях. Соседние аген-

- ты информируют своих «соседей» в случае изменения режима в контролируемых ими районах больше величины нечувствительности.
5. Передача сообщения соседними агентами участнику о разрешении изменений или ретрансляция сообщений о выполненных изменениях соседним агентам.
 6. 1) При разрешении всеми соседними агентами – направление участником инициатору сообщения о возможном снижении перетока на перегруженном элементе и выбор инициатором участника, а также направление ему команды на выполнение действия.
2) Ожидание участником сообщений-запретов от соседних агентов после выполненных воздействий. При наличии запрета – возврат к п. 2, с переводом проверенного действия в набор недоступных.
 7. Реализация реконфигурации сети и проверка инициатором достаточности выполненного действия. В случае недостаточности возврат к п. 2.

Взаимодействие агентов при разделении

1. Идентификация снижения функциональности – появление инициатора (ов).
2. Поиск сечения деления.
3. Направление участником соседним агентам запроса для получения разрешения на выполнение намечаемых/выполненных действий в контролируемом районе. Соседние агенты информируют своих «соседей» в случае изменения режима в контролируемых ими районах больше величины нечувствительности.
4. Направление соседними агентами участникам сообщений-разрешений или отправка сообще-

- ний с данными о выполненных изменениях агентам, находящимся в зоне принятия решений.
5. При разрешении агентами или отсутствии отказов синхронизация всех участников и назначение времени для действий или сохранение изменений. При наличии отказа – корректировка сечения и возврат к п. 3.
 6. Реализация реконфигурации сети.

В процессе реконфигурации агенты могут выполнять действия самостоятельно (без получения разрешений на эти действия от соседних агентов) в случаях, когда производимые ими операции не приводят к изменению режима в контролируемом районе. Например, в схеме распределительного устройства (РУ) высокого напряжения (ВН), показанной на рис. 3, а, изменение состояний выключателей в РУ низкого напряжения (НН) не приводит к изменению потокораспределения мощности в контролируемом районе. В случае перегрузки одного из трансформаторов и при наличии резерва на другом возможна разгрузка трансформатора за счет перераспределения нагрузки по шинам на стороне НН (рис. 3, б).

Деление по шинам в РУ ВН в общем случае меняет распределение мощности по примыкающим к ПС ветвям.

Пример моделирования мультиагентной реконфигурации электроэнергетических систем для снижения перегрузки элемента сети

Для единообразия будем представлять трансформатор, связывающий распределительную сеть с ЕЭС (рис. 4, а), в виде источника генерации с рабочей мощностью, равной значению номинальной

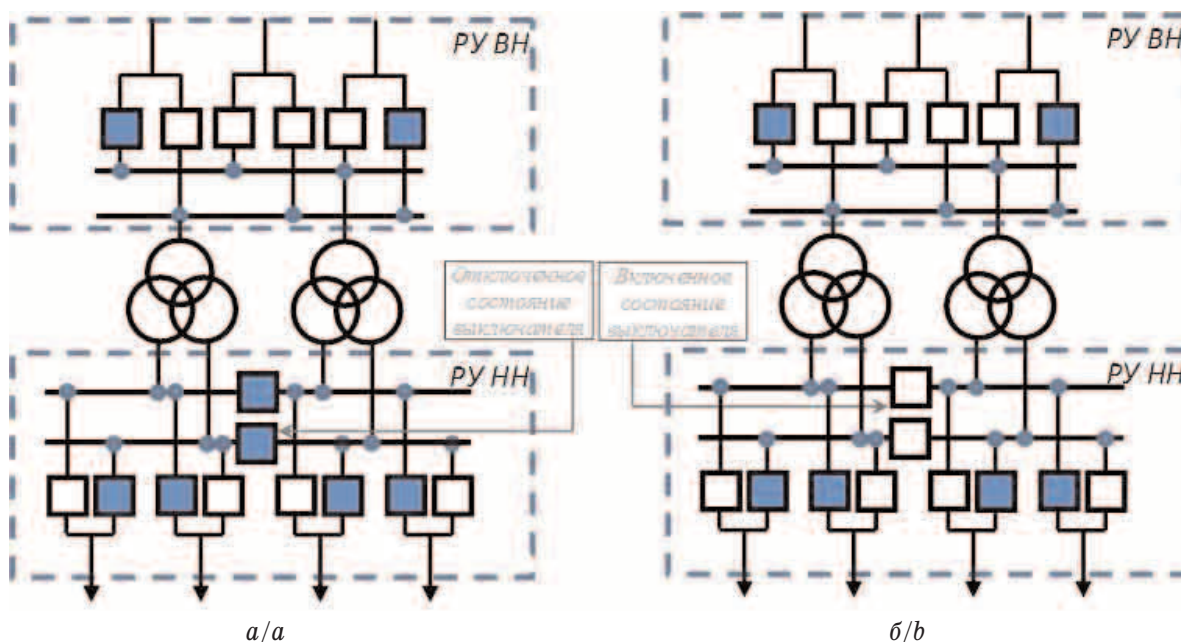


Рис. 3. Пример перекоммутации в РУ с выравниванием нагрузки трансформаторов без изменения потокораспределения в прилегающей сети

Fig. 3. Example of substation scheme reconfiguration with transformers load balancing without changing power flow in the adjacent network

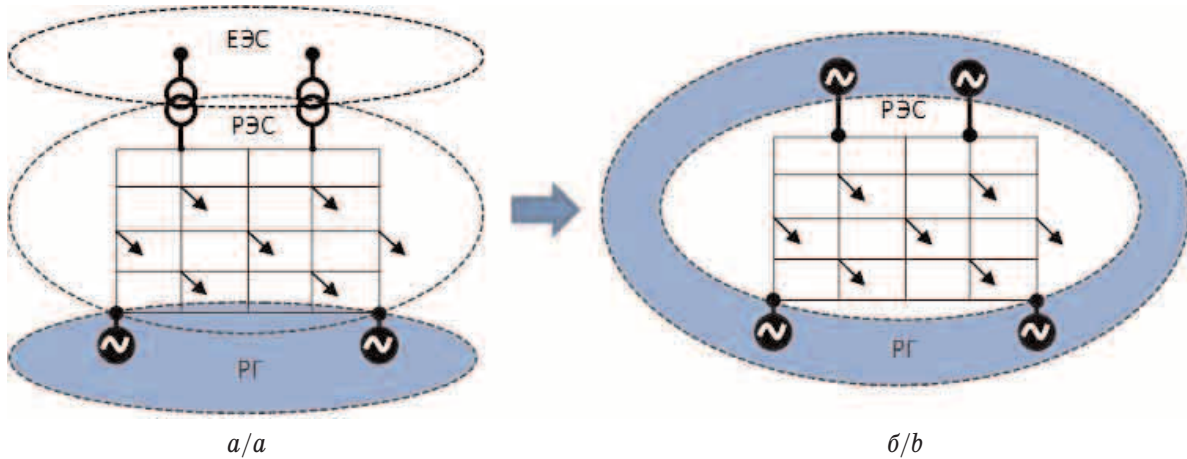


Рис. 4. Основные составляющие ЭЭС

Fig. 4. The main components of the grid

мощности трансформатора (рис. 4, б), где основными элементами являются: ЛЭП, узлы нагрузки и генерации.

Для демонстрации выполнимости мульти-агентной реконфигурации электрической сети смоделируем этот процесс на тестовой схеме с перегруженной ВЛ в цифровой модели (ЦМ), поведение агентов в которой запрограммировано в соответствии с приведенными выше правилами работы МАС при принудительном потокораспределении.

ЦМ МАС разработана в среде Visual Studio с использованием объектно-ориентированного языка программирования C Sharp и расширяемого языка разметки ХАМЛ. В качестве СУБД в ЦМ применена свободная объектно-реляционная система PostgreSQL.

Исходная тестовая схема (электрические сети Атырауской и Мангистауской областей Республики Казахстан номинального напряжения 220/110 кВ) приведена на рис. 5, где представлены значения

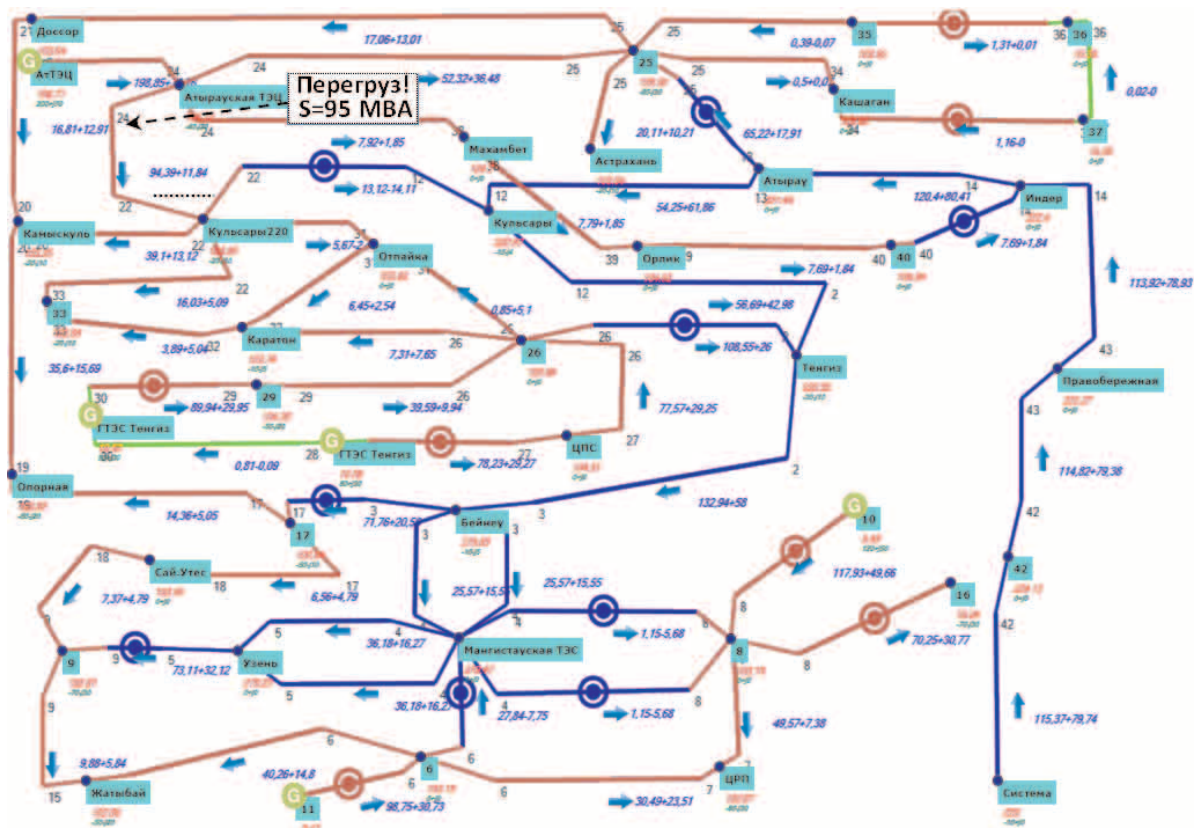


Рис. 5. Исходный режим ЭЭС

Fig. 5. Primary regime of the net

перетоков активной и реактивной мощностей, напряжения и нагрузки в узлах (со знаком «-» – потребление, «+» – выработка).

В исходной схеме перегружена воздушная линия (ВЛ) между узлами 22 и 24 (Атырауская ТЭЦ-ПС Кульсары). При работе МАС произведена реконфигурация, в результате которой на ПС Кульсары шины электрически разделены, а часть ВЛ была переключена на 1 СШ, другая часть – на 2 СШ. С учетом возможной комбинаторики по распределению нагрузок по шинам на 2 СШ была переведена минимально воз-

можная нагрузка (6 МВт из суммарной нагрузки 20 МВт) с сохранением связи с АТ ПС Кульсары. Результат реконфигурации показан на рис. 6.

Для наглядности работы МАС на рис. 7 представлен граф распространения сигналов МАС, а в таблице приведены основные фрагменты «переговоров» агентов, полученные из протокола работы цифровой модели в процессе реконфигурации.

Обменные потоки сообщений содержат данные об узле (ах), в котором произошел реконфигурация (в том числе один уникальный параметр, например

Таблица. Информационный обмен между агентами в процессе реконфигурации

Table. Information exchange between agents during the network reconfiguration

№ шага МАС MAS stages	Действия МАС Multi-agent system (MAS) actions	Примечания Note
1	<p>Начало работы МАС. Активация агентов узлов... Активированы агенты № 1–22 Перегрузка ВЛ, примыкающих к узлам 1–21, нет Активирован агент № 22. ВНИМАНИЕ! Имеется перегрузка ВЛ, примыкающих к узлу № 22 на связях с узлом № 24 Активирован агент № 23. Перегрузки ВЛ, примыкающих к узлу 23, нет Активирован агент № 24. ВНИМАНИЕ! Имеется перегрузка ВЛ, примыкающих к узлу № 24 на связях с узлом № 22 Активированы агенты № 25–43 Перегрузка ВЛ, примыкающих к узлам 25–43, нет</p> <p>MAS starts to work. Agents' node activation... No. 1–22 agents are activated. There are not overloads adjacent to 1–21 nodes lines No. 22 agent is activated. ATTENTION! There is an overload line, on the relations with the no. 24 node that adjacent to the node no. 22 No. 23 agent is activated. There is no overloaded line in adjacent to 23 node lines No. 24 agent is activated. ATTENTION! There is an overload line, on the relations with the no.22 node that adjacent to the node no. 24 No. 25–43 agents are activated There are no overloaded lines in adjacent to 25–43 nodes lines</p>	<p>На данном шаге все агенты анализируют ситуацию в контролируемом районе на наличие перегрузки Агентами № 22 и 24 обнаружена перегрузка ВЛ 22–24</p> <p>At this stage, all the agents analyze the situation in controlled area to find an overload No. 22 and 24 agents detected the overload of 22–24 line</p>
2	<p>ВНИМАНИЕ! Выполнена реконфигурация в узле 22 ATTENTION! Scheme of no. 22 node was reconfigured</p>	<p>Агент № 22 выполнил доступный ему вариант реконфигурации в своей схеме РУ No. 22 agent executed an available scheme reconfiguration option of substation</p>
3	<p>Имитация действия агента Imitation of agent action</p>	<p>Произведен расчет установившегося режима, имитирующий реконфигурацию, для последующего поиска перегрузок в новой схеме Power flow was calculated for simulating reconfiguration and to find overloads in the new net</p>
4	<p>МАС приступает к поиску перегрузок в новой схеме... Следующие узлы, которым будет передано сообщение от агента узла с изменившейся схемой РУ: 20.12.31.33. Начало распространения сообщений по сети...</p> <p>MAS starts looking overloads in the new scheme... The next nodes, which will be informed by the node agent that changed the scheme of substation: 20.12.31.33. Messages distribution on the network starts...</p>	<p>МАС приступает к анализу полученной в результате реконфигурации схемы сети на наличие перегрузок. Сообщения передаются от агента, который выполнил действие (№ 22), к соседним агентам, по связям с которыми произошло изменение перетока мощности более величины нечувствительности (в нашем примере это агенты № 20, 12, 31, 33). Данные агенты являются первыми агентами, вошедшими в зону принятия решений.</p> <p>MAS proceeds to analyze the reconfigured network to find overloads. Messages are sent from the agent which performed the action (no. 22), to neighbor agents, which adjacent lines power flow were changed more than insensitive power flow (in this example, agent number 20, 12, 31, 33). These agents are the first ones which entered the decision zone</p>

Окончание таблицы

Table

№ шага MAS stages	Действия MAS Multi-agent system (MAS) actions	Примечания Note
5	<p>Всего активных агентов = 4 Активирован агент № 20 Исключена из анализа ВЛ, связывающая с агентом, который отправил сообщение: 20–22 Перегрузки ВЛ, примыкающих к узлу 20, нет Следующие узлы № : 19.21. Всего активных агентов = 5 Активирован агент № 12 Исключена из анализа ВЛ, связывающая с агентом, который отправил сообщение: 12–44 Изменение мощности по ВЛ 12–13 меньше допустимой величины Перегрузки ВЛ, примыкающих к узлу 12, нет Следующие узлы № : 2. ... Активированы агенты № 31, 33, 19, 21, 2, 26, 32, 17, 25, 26, 3 ... Всего активных агентов = 5 Активирован агент № 2 Не подлежит ретрансляции сообщение от узла 26 в узле 2 Следующие узлы №: последующих узлов для передачи сообщений нет ... Активирован агент № 32, 26, 3 ... Всего активных агентов = 1 Активирован агент № 17 Не подлежит ретрансляции сообщение от узла 3 в узле 17 Следующие узлы № : последующих узлов для передачи сообщений нет</p> <p>Total active agent = 4 No. 20 agent is activated The line, connecting with the agent, which has sent the message, was excluded from the analysis: 20–22 There is no overloading lines, adjacent to the node 20 The next nodes no.: 19.21. Total active agents = 5 No. 12 agent is activated The line, connecting with the agent, which sent the message, was excluded from the analysis: 12–44 12–13 line power changing is less than the allowable value There are no overloaded lines in adjacent to no. 12 node The next nodes no.: 2. ... No. 31, 33, 19, 21, 2, 26, 32, 17, 25, 26, 3 agents are activated ... Total active agents = 5 No. 2 agent is activated There is no message from node no. 26 to node no. 2 The next nodes no.: there are no nodes to send messages ... No. 32, 26, 3 agents are activated ... Total active agents = 1 No. 17 agent is activated There is no message from node no. 3 to node no. 17 The next nodes no.: there are no nodes to send messages</p>	<p>Агентами производится отправка/прием запросов, на основании которых анализируется ситуация в контролируемом районе и принимается решение о разрешении или отказе. В случае отказа изменения схемы (в нашем примере выполненные агентом № 22) происходит процесс отмены выполненных действий</p> <p>Agents send/receive requests and take decision to allow or reject analyzing the controlled area situation. If the changes of scheme actions are rejected, all actions are canceled (in this example, actions performed by no. 22 agent)</p>
6	<p>Активных агентов нет. Работа MAS успешно завершена. There are no active agents. MAS work is successfully completed</p>	<p>Отсутствие агентов в зоне принятия решений означает, что необходимости в реконфигурации сети нет. Система переходит в режим циклического анализа (шаг № 1). The absence of agents in the decision zone means that the network do not need to be reconfigured. The system goes into the cyclic analysis mode (stage 1).</p>

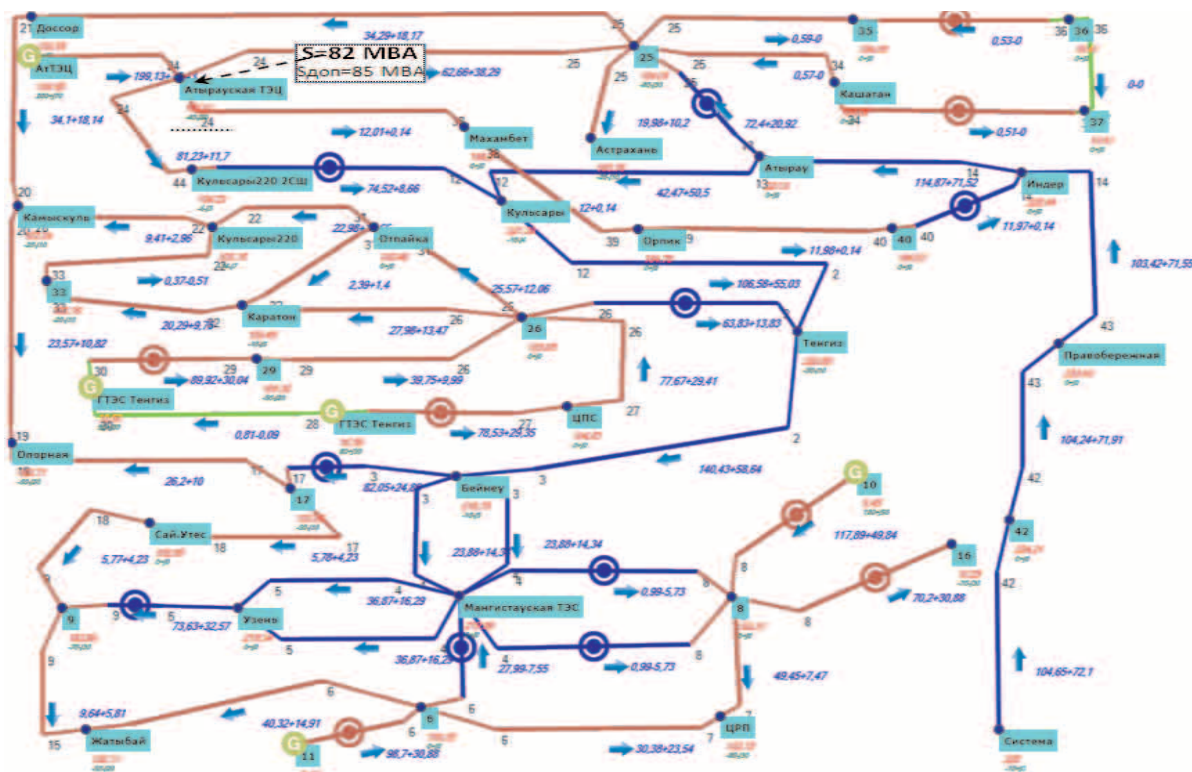


Рис. 6. Режим ЭЭС после реконфигурации

Fig. 6. Net mode after reconfiguration

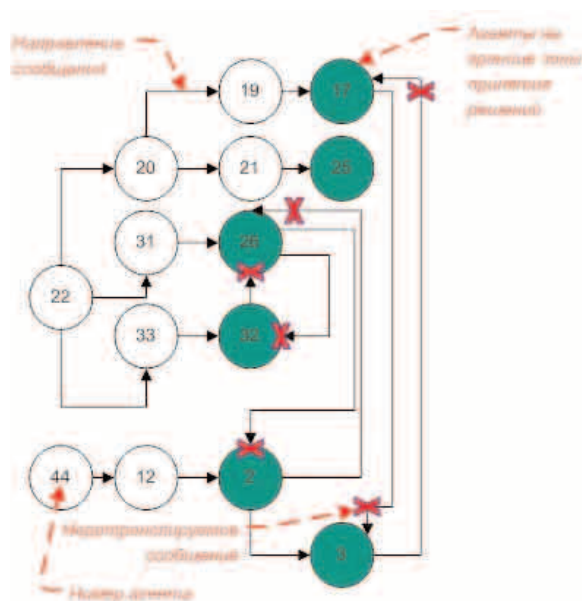


Рис. 7. Распространение сообщений МАС

Fig. 7. MAS messages distribution

его координаты), и время, когда закончилось изменение схемы РУ. Эти данные необходимы для исключения обработки агентами повторных запросов,

информирующих об одних и тех же изменениях, и прекращения их ретрансляции. Сообщения ретранслируются только тем соседям, по связям с которыми произошли изменения перетока мощности более заданного значения нечувствительности (в нашем случае 10 MVA), с исключением из анализа агента, от которого был получен сигнал.

При обнаружении нарушений ограничений обнаруживший это агент сообщает об отказе агенту, направившему ему запрос. Далее происходит передача сообщения-отказа агенту участнику, выполнившему действие. Приняв сообщение-отказ, участник отменяет выполненные действия и восстанавливает исходную схему сети или режим производства-потребления электроэнергии.

Выводы

Проведенные исследования по реконфигурации ЭЭС свидетельствуют о перспективности и работоспособности мультиагентного подхода.

Мультиагентный подход может позволить решить задачу реконфигурации ЭЭС в электрической сети при невозможности централизованного решения из-за недостатка информации о схемно-режимных параметрах. МАС обладает высокой надежностью, так как при потере любого из агентов она способна адекватно функционировать без учета потерянного элемента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воропай Н.И. Интеллектуальные электроэнергетические системы: концепция, состояние, перспективы // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2011. – № 3 (20). – С. 4–11.
2. Воропай Н.И. Распределенная генерация в электроэнергетических системах // Международная научно-практическая конференция «Малая энергетика-2005» URL: <http://www.combi-energy.ru/stat983.html> (дата обращения 01.10.2014).
3. Бартоломей П.И., Паниковская Т.Ю., Чечушков Д.А. Анализ влияния распределенной генерации на свойства ЭЭС // Объединенный симпозиум в рамках проекта АТЭС «Энергетические связи между Россией и Восточной Азией: стратегии развития в XXI ВЕКЕ». – Иркутск, 2010. – С. 4–5.
4. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. – М.: ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.
5. Фишов А.Г. Структурная адаптация электроэнергетических систем к режимам: дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 1992. – 332 с.
6. Фишов А.Г., Ефремов И.А., Мукатов Б.Б. Исследование реконфигурации электрических сетей с распределенной генерацией в аварийных режимах // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2014. – № 4 (25). – С. 90–103. DOI: 10.17212/1727-2769-2014-4-90-103.
7. Zhenhua Jiang. Agent-Based Control Framework for Distributed Energy Resources Microgrids // Intelligent Agent Technology, 2006. IAT '06. IEEE/WIC/ACM International Conference. – Hong Kong, 2006. – P. 646–652. DOI: 10.1109/IAT.2006.27.
8. Sergio Rivera, Amro Farid, Kamal Youcef-Toumi. Coordination and Control of Multiple Microgrids Using MultiAgent Systems // EnergyPath 2013: Our Global Sustainable Energy Future. – Philadelphia, PA, USA, 2013. – P. 1–5.
9. Stephen McArthur, Phil Taylor. Distributed Smart Control. URL: <https://drive.google.com/file/d/0B2wnQuwdaa09V0hZOGRRMlQ0Rms/view?usp=sharing> (дата обращения 01.10.2014).
10. Dolan M.J., Davidson E.M., Ault G.W., Bell K.R.W., McArthur St.D.J. Distribution Power Flow Management Utilizing an Online Constraint Programming Method // IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID. – 2013. – V. 4. – P. 798–805. URL: <https://drive.google.com/file/d/0B2wnQuwdaa09aG-lkUUR4bFM3aW8/view?usp=sharing> (дата обращения 01.10.2014). DOI: 10.1109/TSG.2012.2234148.
11. A Multi-Agent Framework for Operation of a Smart Grid / Ruchi Gupta, Deependra Kumar Jha, Vinod Kumar Yadav, Sanjeev Kumar // Energy and Power Engineering. – 2013. – V. 5. – P. 1330–1336.
12. Chatzivasiliadis S.J., Hatzigiorgiou N.D., Dimeas A.L. Development of an Agent Based Intelligent Control System for Microgrids // Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE. – P. 1–6. DOI:10.1109/PES.2008.4596481.
13. AuRA-NMS: An Autonomous Regional Active Network Management System for EDF Energy and SP Energy Networks / E.M. Davidson, M.J. Dolan, G.W. Ault, S.D.J. McArthur // Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE. – P. 1–6. DOI:10.1109/PES.2010.5590045.
14. Cohen D.A. Intelligent Agent Applications for Integration of Distributed Energy Resources within Distribution Systems // Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE. – P. 1–5. DOI: 10.1109/PES.2008.4596818.
15. Cohen D. Is Distributed Generation the Future of the Grid? // ACORE National Monthly Teleconference. – Denver, CO, January 17, 2007.
16. Nagata T., Sasaki H. A Multi-Agent Approach to Power System Restoration // IEEE transactions on power systems. – 2002. – V. 17. – № 2. – P. 457–462. DOI:10.1109/TPWRS.2002.1007918.
17. Hak-Man Kim, Tetsuo Kinoshita, Myong-Chul Shin. Multiagent System for Autonomous Operation of Islanded Microgrids Based on a Power Market Environment // Energies. – 2010. – V. 3. – Iss. 12. – P. 1972–1990. DOI: 10.3390/en3121972.
18. Operation of Microgrid Reconfiguration based on MAS (Multi-Agent System) / Chong Shao, Chen Xu, Shan He, Xiangning Lin // TENCON 2013 – 2013 IEEE Region 10 Conference (31194) – P. 1–4. DOI: 10.1109/TENCON – 2013.
19. Фишов А.Г., Мукатов Б.Б. Обеспечение живучести энергосистем при развитии распределенной генерации // Вестник Алтайского университета энергетики и связи. – 2013. – № 4 (23). – С. 6–15.
20. Фишов А.Г., Мукатов Б.Б. Использование превентивного деления электрической сети в режимах повышенного риска // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – № 4. – С. 215–219.

Поступила 18.06.2015 г.

UDC 621.311

RECONFIGURATION OF ELECTRIC NETWORKS WITH DISTRIBUTED GENERATION AND MULTI-AGENT CONTROL

Alexander G. Fishov,

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: fishov@ngs.ru

Bekzhan B. Mukatov,

Branch of «KEGOC» JSC «National Dispatching Centre of System Operator», 37, Beibitshilik Avenue, Astana, 010000, Kazakhstan. E-mail: mukatov@kegoc.kz

The relevance of the discussed issue is caused by the need to ensure the functionality of power systems with the inevitable introduction of distributed generation sources in the distribution networks, as a rule, without centralized dispatching system. As a result, this increases the efficiency of energy production and distribution and leads to savings geo assets.

The main aim of the study is to develop a reconfiguration method for a power system with multi-agent control to reduce the overload of electric equipment and to ensure the survivability of power systems by network division and restoration.

The methods used in the study: system and object-oriented approaches, mathematical modeling of grid modes with multi-agent reconfiguration.

The results. The authors have developed the multi-agent grid reconfiguration method, the digital model of grid with multi-agent control; defined the principles of constructing the multi-agent system and the stages of its operation at the network reconfiguration. General and specific rules for the agents of the decentralized multi-agent system were stated. Awareness of these rules and regime parameters of the network adjacent to the agents is sufficient for making decision on dividing option of the network. The authors simulated the reconfiguration of the network with distributed generation at multi-agent control at test scheme. The paper introduces the results confirming the efficiency and effectiveness of the method.

Conclusions. Management of the distribution network should be decentralized, based on multi-agent technology, as this approach is most effective in observability modes absence. The studies on reconfiguration of power system indicate the prospects and performance of multi-agent approach. If the centralized power system reconfiguration is impossible or inappropriate, the multi-agent approach can effectively solve the problem of ensuring the functionality of the electric power system. The multi-agent system is highly reliable and it is able to function adequately even at loss of any of the agents.

Key words:

Distributed generation, power system functionality, power system survivability, reconfiguration of power grid, multi-agent system, agent, general and special rules.

REFERENCE

- Voropay N.I. Intellekturnye elektroenergeticheskie sistemy: kontseptsiya, sostoyanie, perspektivy [Intelligent power systems: the concept, status and prospects] *Avtomatizatsiya i IT v energetike*, 2011, no. 3 (20), pp. 4–11.
- Voropay N.I. Raspredelelnaya generatsiya v elektroenergeticheskikh sistemakh [Distributed generation in power systems]. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Malaya energetika-2005»* [International scientific conference. Small power engineering 2005]. Available at: <http://www.combienergy.ru/stat983.html> (accessed 1 October 2014).
- Bartolemei P.I., Panikovskaya T.Yu., Chechushkov D.A. Analiz vliyaniya raspredelennoy generatsii na svoystva EES [Analysis of the impact of distributed generation on the properties of EPS]. *Obedinenny simpozium v ramkakh proekta ATEES «Energeticheskie svyazi mezhdu Rossiei i Vostochnoy Aziei: strategii razvitiya v XXI VEKE»* [Symposium. Power engineering relations between Russia and Eastern Asia: strategies of development in XXI century]. Irkutsk, 2010. pp. 4–5.
- Kobets B.B., Volkova I.O. *Innovatsionnoe razvitie elektroenergetiki na baze kontseptsii Smart Grid* [The innovative development of electric power industry on the basis of the Smart Grid concept]. Moscow, Publ. Center «Energiya», 2010. 208 p.
- Fishov A.G. *Strukturnaya adaptatsiya elektroenergeticheskikh sistem k rezhimam*. Dis. Dokt. nauk [Structural adaptation of electric power systems to regimes. Diss. Dr. Sc.] Novosibirsk, 1992. 332 p.
- Fishov A.G., Efmov I.A., Mukatov B.B. Issledovanie rekonfiguratsii elektricheskikh setey s raspredelennoy generatsiyey v varynykh rezhimakh [Study of reconfiguration of electric networks with distributed generation in emergency conditions]. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiiskoy Federatsii*, 2014, no. 4 (25), pp. 90–103. DOI: 10.17212/1727-2769-2014-4 90-103.
- Zhenhua Jiang. Agent-Based Control Framework for Distributed Energy Resources Microgrids. *Intelligent Agent Technology, 2006. IAT 06. IEEE/WIC/ACM International Conference*. Hong Kong, 2006. P. 646–652. DOI: 10.1109/IAT.2006.27.
- Sergio Rivera, Amro Farid, Kamal Youcef-Toumi. Coordination and Control of Multiple Microgrids Using MultiAgent Systems. *Energypath 2013: Our Global Sustainable Energy Future*. Philadelphia, PA, USA, 2013. pp.1–5.
- Stephen McArthur, Phil Taylor Distributed Smart Control. Available at: <https://drive.google.com/file/d/0B2wnQuwdaa09V0hZOGRRMIQ0Rms/view?usp=sharing> (accessed 1 October 2014).
- Dolan M.J., Davidson E.M., Ault G.W., Bell K.R.W., McArthur St.D.J. Distribution Power Flow Management Utilizing an Online Constraint Programming Method. *IEEE transactions on Smart Grid*, 2013, vol. 4, pp. 798–805. Available at: <https://drive.google.com/file/d/0B2wnQuwdaa09aG1kUUR4bFM3aW8/view?usp=sharing> (accessed 1 October 2014). DOI: 10.1109/TSG.2012.2234148.
- Ruchi Gupta, Deependra Kumar Jha, Vinod Kumar Yadav, Sanjeev Kumar. A Multi-Agent Framework for Operation of a Smart Grid. *Energy and Power Engineering*, 2013, vol. 5, pp. 1330–1336.
- Chatzivasiladis S.J., Hatzigiorgiou N.D., Dimeas A.L. Development of an Agent Based Intelligent Control System for Microgrids. *Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*. pp. 1–6. DOI: 10.1109/PES.2008.4596481.
- Davidson E.M., Dolan M.J., Ault G.W., McArthur S.D.J. AuRANMS: an Autonomous Regional Active Network Management System for EDF Energy and SP Energy Networks. *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*. pp. 1–6. DOI: 10.1109/PES.2010.5590045.
- Cohen D.A. Intelligent Agent Applications for Integration of Distributed Energy Resources within Distribution Systems. *Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*. pp. 1–5. DOI: 10.1109/PES.2008.4596818.
- Cohen D. Is Distributed Generation the Future of the Grid? *ACORE National Monthly Teleconference*. Denver, CO, January 17, 2007.
- Nagata T., Sasaki H. A Multi-Agent Approach to Power System Restoration. *IEEE transactions on power systems*, 2002, vol. 17, no. 2, pp. 457–462. DOI: 10.1109/TPWRS.2002.1007918.
- Hak-Man Kim, Tetsuo Kinoshita, Myong-Chul Shin. Multiagent System for Autonomous Operation of Islanded Microgrids Based on a Power Market Environment. *Energies*, 2010, vol. 3, Iss. 12, pp. 1972–1990; DOI: 10.3390/en3121972.
- Chong Shao, Chen Xu, Shan He, Xiangning Lin. Operation of Microgrid Reconfiguration based on MAS (Multi-Agent System). *TENCON 2013 – 2013 IEEE Region 10 Conference (31194)*. pp. 1–4. DOI: 10.1109/TENCON – 2013.
- Fishov A.G., Mukatov B.B. Obespechenie zhivuchesti energosistem pri razvitiy raspredelennoy generatsii [Ensuring power systems survivability when developing distributed generation]. *Vestnik Almatinskogo universiteta energetiki i svyazi*, 2013, no. 4, (23), pp. 6–15.
- Fishov A.G., Mukatov B.B. Ispolzovanie preventivnogo deleniya elektricheskoy seti v rezhimakh povyshennogo riska [Using preventive division of power grid in high-risk conditions]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka*, 2014, no. 4, pp. 215–219.

Received: 18 June 2015.