

Мультиагентная система иерархического управления режимом электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью

И.Б. ЯДЫКИН, С.Н. ВАСИЛЬЕВ, Н.Н. БАХТАДЗЕ
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия
Jad@ipu.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

Интеллектуальная электроэнергетическая система, активно-адаптивная сеть, динамическое прогнозирование нарушения статической устойчивости, адаптивное управление, кибербезопасность.

1 ВВЕДЕНИЕ

Предметом исследования настоящей работы являются вопросы создания интегрированной мультиагентной системы управления режимом электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС) с возможностью гибкой реконфигурации иерархических связей, которая будет осуществлять глобальный мониторинг и контроль функционирования ИЭС ААС. Интеллектуальная электроэнергетическая система с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС) представляет собой энергосистему нового поколения, целью которой является обеспечение эффективного использования всех видов ресурсов (природных, социально-производственных и человеческих) для надежного, качественного и эффективного энергоснабжения потребителей. Эта цель вполне может быть достигнута за счет гибкого взаимодействия субъектов (субъектов генерации всех видов, электрических сетей и потребителей) на основе современных технологических средств и единой интеллектуальной системы управления [1].

Сложность управления ЕНЭС сегодня настолько высока, что полностью централизованное управление становится неэффективным из-за наличия огромных потоков информации, когда слишком много времени тратится на ее передачу в центр и принятие им решений. Системы управления включают ряд подсистем, обладающих различными функциональными характеристиками и взаимодействующих с различными специалистами, удаленными друг от друга. Поэтому некоторые элементы организационного управления могут быть переданы от центра к периферии с четким разграничением прав и информационного доступа.

Управление режимом энергосистемы в сложившихся экономических условиях должно стать интеллектуальным: координирующая система управления ЕНЭС России верхнего уровня должна представлять собой иерархическую информационно-управляющую систему, гибко функционирующую в формате мультиагентной технологии на основе стандартизованных протоколов и интерфейсов взаимодействия. Настройка моделей (энергообъектов, фрагментов либо энергосистемы в целом) позволит формировать рекомендуемые управляющие воздействия, которые могут быть использованы как в системах автоматического и автоматизированного управления технологическими процессами, так и в системах глобального контроля и управления энергосистемой – в качестве поддержки принятия управленческих решений [3].

В условиях возрастающих требований к надежности и качеству энергоснабжения оптимизация режимов работы энергообъектов заключается в организации оптимальной загрузки, обеспечении нормативных запасов устойчивости на основе динамического анализа устойчивости, минимизации потерь электроэнергии, предотвращении или снижении холостых сбросов, и, как результат - обеспечении высокого уровня надежности энергосистемы в целом [2]. Такие требования можно обеспечить на основе управления с прогнозирующими динамическими моделями. Для реализации такого управления необходимы системы,

позволяющие прогнозировать состояние энергосистемы на базе данных по текущей выработке, потреблению и резервным мощностям.

Интерактивное взаимодействие агентов технологического управления и коммерческого учета разных уровней и различного функционального назначения, должно осуществляться на основе создания распределенной информационно-технологической среды ИНЭС ААС, реализующей синхронизированный информационный обмен и оптимизацию управления между различными подсистемами.

В настоящее время мультиагентные системы нашли применение в различных системах управления энергообъектами в США, Японии, Индии, Китае и Евросоюзе [4]. Такие системы активно внедряются в целом ряде задач энергетики, однако, нет прецедента их применения для создания глобальной системы управления энергосистемой. Однако проекты, направленные на решение этой задачи, уже существуют и частично начинают реализовываться.

Можно обозначить ряд направлений реального внедрения МАС управления (МАСУ) в энергетике:

- **Обслуживание сетей передачи электроэнергии.**

К таким системам относятся, в частности, МАС – приложения к типовым средствам автоматизации в электрических сетях. [5]. Если ранее каждая подстанция имела централизованную управляющую систему, то современные подстанции оснащаются распределенными интеллектуальными электронными устройствами контроля и управления (IEDs), которые выполняют различные задачи по передаче и обработке данных в корпоративной сети [6].

- **МАС мониторинга и информационно-управляющие мультиагентные системы**

Структура обязана обеспечивать открытый доступ к информации подстанции через глобальную сеть энергетической компании и объединять предварительно обработанные функции защиты, контроля и информационного управления [7]. Действующие системы автоматизации оказываются недостаточно гибкими и не могут легко адаптироваться к новым требованиям и изменениям типа оборудования. Поэтому все чаще внедряются МАС, настраиваемые над типовыми средствами автоматизации в электрических сетях, например, системы для устранения ошибок идентификации и сервисного восстановления в электросети.

- **МАСУ коммутационным оборудованием.**

Системы такого функционального назначения [8] включают: агентов-помощников, агентов оборудования и агентов распределения. Агенты оборудования представляют трансформаторы, шины и линии передачи, и следят за операционным состоянием, временем обслуживания и временем использования элементов оборудования. Агенты распределения представляют выключатели, или группы выключателей.

- **МАСУ расчетами за услуги электроснабжения.**

Например, в [9] представлено описание функционирования системы ведения переговоров между агентами, представляющими независимых системных операторов и компании, осуществляющие передачу электроэнергии потребителям.

- **МАС оптимизации распределения электроэнергии.**

Системы данного типа содержат ряд агентов конечных устройств потребителей, а также сервисных агентов, которые участвуют в электронных аукционных торгах электроэнергии [6]. Система переговорной среды гибко адаптируется к изменению цен в пределах нескольких аукционных шагов. Преимущества системы состоят в том, что она способна взаимодействовать с крупномасштабными системами и может быть настроена на индивидуальные требования в широком диапазоне приложений. В 2005 был создан комитет The Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA), под эгидой которого разрабатываются основные нормативные документы создания мультиагентных систем, в том числе, в энергетике. Как отмечают специалисты [10], сегодня остро стоит *проблема развития*

технологий и методов анализа данных. Применение MAC позволит, например, преодолеть расхождение в мониторинге основных ключевых показателей, таких как, например, продолжительность среднего прерывания Системы (индекс SAIDI) в США и минутные потери потребителя (customerminuteslost) Великобритании. Одной из методологий решения такой задачи является MAC, где большая система составляется из подсистем различной функциональности.

Все утилиты в системах управления должны соответствовать стандартам обмена данными, таким как Общая информационная модель (CommonInformationModel - CIM) [13] и IEC 61850. FIPA разработал комплект специализированных стандартов, покрывающих все типы взаимодействий агентов в энергосистеме. Именно эти стандарты являются легитимными для мультиагентных систем в энергетике:

- Транспортировка и доставка сообщений в MAC регламентируются стандартом FIPA'sAgentManagementReferencemodel, который регламентирует логическую модель взаимодействия агентов.
- Стандарт FIPA AgentCommunicationLanguage (FIPA-ACL) регламентирует структуру и поток сообщений между агентами на агентской платформе FIPA.
- Описание контента сообщений описывается стандартом FIPA SemanticLanguage (FIPA-SL)(синтаксис и семантика, или грамматика и лексика содержания сообщения, атакже язык онтологий).

- **Разработки технологий формализации рассуждений**

Выбор технологии формализации рассуждений для различных агентов в различных MAC специфичен. Известны некоторые стандартные решения, такие как типовые планировщики в системах искусственного интеллекта, или системы, основанные на Belief-Desire-Intention (BDI) – архитектурах.

На начальной стадии появления мультиагентных систем управления парадигма агента, основанного на знаниях, основывалась на классическом логическом подходе. Однако такой подход очень быстро продемонстрировал свою ограниченность, в силу ряда проблем, к которым относятся, например, следующие: проблема неразрешимости исчисления предикатов первого порядка, лежащего в основе такого подхода; сложность поиска выводов; (отсюда - эвристический поиск как основа методики решения задач ИИ); проблемы, не поддающиеся алгоритмическим решениям; необходимость принятия решений в ситуациях, когда получение оптимальных или точных ответов слишком трудоемко или невозможно; выделение значительных качественных характеристик ситуации, в которой действует агент; необходимость принятия решений определенных задач на основе неточной, недостаточной или плохо определенной информации; необходимость использования знаний метауровня для более совершенного управления стратегиями принятия решений; сложность проектирования логико-физического интерфейса, и ряд других.

Более того, такие ментальные свойства агента, как предпочтения, убеждения, желания, намерения, обязательства по отношению к другим агентам и т.д., невыразимы в терминах классической логики. Были разработаны *логики оценок*, некоторые специальные варианты *конструктивных, немонотонных, индуктивных и модальных логик*, которые оказались более удачными с точки зрения реализуемости. Стали использоваться также методы принятия решений в условиях многокритериальности, неопределенности и риска, методы обучения агента предпочтениям другого – для планирования взаимодействия с ним. Для облегчения логико-физического интерфейса и других приложений используются искусственные нейронные сети и различные методы распознавания образов, в сочетании с логическими и другими методами искусственного интеллекта.

- **Разработки архитектур MACУ**

Реализуемые в современных системах управления архитектуры мультиагентных систем можно отнести к следующим типам:

- Архитектуры, базирующиеся на принципах и методах ИИ (deliberativeagentarchitectures)

- Реактивные архитектуры, основанные на поведении и на реакции на события внешнего мира (reactiveagentarchitectures). В частности, использующие теорию игр, сценарные модели виртуальных миров, и т.д.
- Гибридные многоуровневые архитектуры (hybridagentarchitectures).
- Были разработаны некоторые специальные варианты расширений модальных логик и подобных, которые оказались наиболее удачными с точки зрения реализуемости (Belief-Desire-Intention (BDI) – архитектуры).

Для специализированных приложений используются специальные решения, основанные на применении нейронных сетей и различных методах распознавания образов.

В литературе освещается подход к разработке ряда мультиагентных систем в области энергетики:

- Интеллектуальная АРЧМ
- Интеллектуальная система управления спросом
- Интеллектуальная система поддержания заданной степени устойчивости и самовосстановления ЭЭС
- Интеллектуальная «иммунная система», осуществляющая раннее распознавание внешних и внутренних угроз, их географической локализации и определение степени опасности
- Интеллектуальная система группового регулирования активной и реактивной мощности виртуальной электростанции местной торговой площадки.
- Мультиагентные системы диагностики отказов и реконфигурации управления

Целью настоящего исследования является анализ возможности позиционирования некоторых из этих систем как фрагментов глобальной системы управления режимом ЕНЭС, охватывающих различные аспекты ее функционирования методологии глобальной системы управления

2.ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Основой функционирования интеллектуальной системы управления режимом становится динамическая оценка и интеллектуальное прогнозирование состояния ЭЭС с целью адаптивного управления и динамической поддержки принятия решений.

Настоящий период функционирования энергосистемы характеризуется следующими факторами:

- частое приближение ЭЭС к предельным по устойчивости переходным режимам
- незначительный временной интервал для принятия решений диспетчером
- необходимость координации управления в локальных сетях крупных потребителей и глобальной электрической сети
- необходимость автоматизации восстановления режима ЭЭС.

Перечисленные факторы требуют использования новых стратегий управления, основанных на автоматическом удержании режима энергосистемы в безопасном состоянии с гарантированным запасом устойчивости. Данную стратегию можно реализовать путем комплексного использования интеллектуальной автоматической системы определения степени статической устойчивости ЭЭС и интеллектуальной автоматической системы поддержания гарантированной устойчивости ЭЭС[2].Использование мультиагентного подходапозволяет реализовать эту комплексную стратегию управления, что позволит пересмотреть действующие нормативные запасы устойчивости в сторону их уменьшения и расширить в перспективе пропускную способность электрических сетей. Наряду с обеспечением гарантированного запаса устойчивости ЭЭС важнейшими задачами управления являются распознавание внешних и внутренних угроз, их географическая локализация и определение степени опасности.

Таким образом, повышение энергоэффективности функционирования ИЭС ААС не представляется реализуемым безсоздания глобальной иммунной системы в ААС, которая

позволит в автоматическом режиме осуществлять не только самовосстановление после аварий, но и осуществлять комплекс превентивных мер по их предотвращению. Такой подход реализует существенное продвижение к реализации стратегии предаварийного управления с одновременным повышением эффективности.

2.1. Функции Интеллектуальной иммунной системы ИЭС ААС

Интеллектуальная иммунная система ИЭС ААС, в аспекте вышеперечисленных основных целей, должна обеспечить выполнение следующих основных функций:

- мониторинг состояния окружающей среды и внутреннего состояния энергосистемы с пополнением базы технологических знаний (прием, обработка, архивирование и представление информации персоналу)
- мониторинг степени статической устойчивости электрической сети в реальном масштабе времени
- настройка в реальном времени прогнозирующей модели динамики текущего режима
- выявление опасного отклонения состояния системы от прогнозируемого состояния модели и его локализация (агент прогноза опасного состояния энергосистемы)
- прогноз аварийной ситуации (на основе интеллектуального ассоциативного поиска прецедента)
- расчет управляющих воздействий и формирование рекомендаций по предотвращению развития угрозы и самовосстановления нормального режима (система интеллектуального ассистента оператора).

2.2. Подсистема мониторинга степени статической устойчивости электрической сети в реальном масштабе времени

Данная система осуществляет вычисление запасов статической устойчивости в ЕНЭС в реальном масштабе времени и выдает рекомендации диспетчеру для поддержания заданных запасов статической устойчивости в ЕНЭС и восстановления нормального режима после системной аварии.

В основе технологии лежит разработанный в ИПУ РАН метод грамианов определения степени устойчивости линейных динамических систем, исследования по построению математических моделей электрических сетей ЭЭС ИСЭМ и НТЦЭ.

Система мониторинга степени статической устойчивости электрической сети в реальном масштабе времени выполняет следующие функции:

- прием, обработка, архивирование и представление информации персоналу (текущие значения напряжения, активной и реактивной мощности, получаемые от СМНР, АСУТП и ОИК)
- формирование структуры математической модели электрической сети с примыкающей распределенной генерацией и потребителями
- автоматическая адаптация параметров модели к текущему режиму (агент настройки параметров модели)
- верификация модели в реальном времени (агент верификации модели)
- подготовка информации для интеллектуального решателя задач
- решение задач определения степени статической устойчивости, типа возможной неустойчивости и наиболее опасного сечения электрической сети (агент интеллектуального решателя задач)
- подготовка информации для экспертной системы
- формирование рекомендаций для принятия решений диспетчером
- инициация команд на включение автоматики предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ).

Поддержка принятия решений об управлении и/или формирование управляющих воздействий при решении различных технологических задач осуществляется на основе интеллектуальных алгоритмов идентификации нелинейных динамических моделей. Алгоритмы основаны на индуктивном обучении: ассоциативном поиске аналогов на базе

интеллектуального анализа архивов технологических параметров режимов энергосистемы(Data Mining) и базы технологических знаний.

Построение прогнозирующей модели методом ассоциативного поиска динамического объекта на каждом такте осуществляется на основе знаний, формируемых из технологических данных. Такой подход реализует возможность использования дополнительной априорной информации об объекте. В целях увеличения быстродействия алгоритма (что является одним из ключевых показателей качества работы алгоритмов) и существенной экономии вычислительных ресурсов должно осуществляться обучение системы. Критерий отбора входных векторов из архива для построения виртуальной модели в данный момент времени по текущему состоянию объекта определяет выбор метода кластеризации.

При разработке алгоритмов эффективно использование методов нечеткой логики. Таким образом, новые методы предполагают использовать для идентификации реального объекта моделирование поведения лица, принимающего решение, основанное на формализации технологических знаний.

2.3. Интеллектуальная система группового регулирования активной и реактивной мощности виртуальной электростанции местной торговой площадки

Наряду с основными вышеперечисленными функциями глобальной иммунной системы ИЭС ААС целесообразно разрабатывать системы группового управления, реализующие следующие цели:

- поддержание заданных системным оператором диспетчерских графиков напряжения в заданном коридоре при аварийном отключении источников распределенной генерации (например, ВИЭ, или аварии в сети, или на одном из источников генерации) - системная услуга внутри локальной энергосистемы
- предоставление через распределенные и магистральные сети резервной активной и реактивной распределенной генерации локальной энергосистемы в качестве внешней системной услуги генерации на оптовом рынке электроэнергии и мощности.

Можно выделить следующие механизмы достижения означенных целей:

- использование свободной распределенной генерации за определенную плату для поддержания необходимого баланса активной и реактивной мощности виртуальной электростанции
- применение коллективных стратегий МАС, представляющих отдельные электростанции – продавцов системной услуги - с целью оптимизации режима и восстановления указанных балансов.

В виртуальной энергосистеме должны быть предусмотрены источники резервной распределенной генерации или энергии аккумуляторов большой емкости для целей стабилизации частоты и восстановления баланса активной и реактивной мощности. Нарушение устойчивости работы ЭЭС, вызванное изменением нагрузки, ее характера, короткими замыканиями и т.д., приводит к народнохозяйственному ущербу из-за необходимости отключения линий, питающих потребителей. Для недопущения подобных ситуаций используется автоматика предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ), выполняющая действия по повышению пропускной способности линий электропередач, изменения настройки автоматических регуляторов возбуждения, мощности турбогенераторов и др.

Архитектура этих систем представляет собой гибкую структуру, состоящую из вложенных сетевых кластеров МАС вертикальной интеграции. Можно выделить следующие основные уровни иерархии, в каждом из которых функционируют подсистемы различного назначения, каждая из которых реализует мультиагентную методологию управления:

- МАС подстанций,
- МАС Центров управления сетями,
- МАС Центра управления регионального сегмента,
- МАС Центра координирующего (глобального) сегмента.

Наряду с формированием вертикальных слоев в иерархии МАС, выделяются горизонтальные слои, определяющие географическое расположение МАС одинакового функционального назначения.

Режим определения угрозы нарушения устойчивости ЭЭС МАС безопасности

МАС безопасности обнаруживает место возникновения и величину небаланса мощности и определяет зоны ответственности МАС региональных информационных и управляющих кластеров, управляющих кластеров распределительных сетей и потребителей (формирование группы агентов). Особенно важной является функция географической координации интеллектуальных автоматических систем определения степени статической устойчивости локальных энергосистем, которая обеспечивает контроль не только степени устойчивости критического фрагмента энергосистемы, но и степени устойчивости соседних локальных энергосистем $i=1,2,\dots,n$.

Режим коллективного планирования превентивных действий МАС1- МАСn

МАС1- МАСn в режиме реального времени планируют (формирование совместного плана) совместные действия с целью восстановления режима с гарантированной степенью устойчивости. Эти действия могут включать анализ возможных сценариев действий мультиагентных систем управления по восстановлению нормального режима и формирование оптимального плана. Для реализации сценариев используют платформы моделирования и оптимизации реального времени.

Режим координированного управления адаптивными интеллектуальными агентами в МАС1- МАСn с целью восстановления нормального режима

Оптимальный план управления восстановлением нормального режима должен быть исполнен агентами нижнего уровня МАС, которые исполняют действия превентивного характера (совместные действия), например, путем координированного управления системами возбуждения генераторов в соседних энергосегментах.

При возникновении асинхронного хода (распознавание) МАС изолированной энергосистемы выполняет действия (формирование группы агентов и планирование) по предотвращению посадки генераторов на нуль (наиболее тяжелая системная авария, которая может возникнуть вследствие большого дефицита активной мощности), поддержанию автономного энергоснабжения изолированной энергосистемы и восстановления синхронного хода (совместные действия).

Основное преимущество использования мультиагентных технологий в такой ситуации состоит в исключении человеческого фактора в режимах ситуационного управления и повышение системной надежности за счет своевременной и быстрой реконфигурации управляющих кластеров при отказах сетевого или вычислительного оборудования.

2.4. Распознавание внешних и внутренних угроз и их географическая локализация, определение степени опасности и автоматического самовосстановления ЭЭС

Принципиально важным преимуществом ИЭС ААС является ее способность предвидеть возникающие внешние и внутренние угрозы и мгновенно реагировать на них, добиваясь их ликвидации или уменьшения степени их воздействия на функционирование ИЭС ААС в нормальных, предаварийных, аварийных и послеаварийных режимах. Подобными свойствами обладает иммунная система животного, в частности, человека, поэтому интеллектуальную многоагентную систему, входящую в ИЭС ААС можно назвать «иммунной». Существующая автоматическая система управления и ПАЗ ЭЭС не обладает в полной мере подобными свойствами, хотя отдельные функции ПАА (например, АРЧМ, АПНУ, АЧР, АОСН, автоматические системы повторного включения) в существенно усеченном виде реализуют функции «иммунной» интеллектуальной системы. Кроме того, на стадии планирования режимов предусматривают - с помощью моделирования – способность к самовосстановлению (нечувствительность) системы при отключении одной из линий; сами нагрузки выбираются с некоторыми запасами по отношению к ожидаемым пиковым значениям.

Можно выделить следующие типы внешних угроз:

- терроризм
- киберугрозы
- природные катаклизмы
- техногенные катастрофы

и типы внутренних угроз:

- появление нерасчетных возмущений
- угроза возникновения и развития каскадной аварии

- угроза нарушения устойчивости в нормальных режимах
- угроза нарушения устойчивости в переходных режимах
- угроза нарушения термической устойчивости
- угроза неправильных решений и/или действий оперативного персонала.

К основным функциям подсистемы относятся:

- обнаружение места возникновения и степени опасности угрозы
- локализация и изоляция угрозы
- превентивное адаптивное управление
- реконфигурация системы управления

В системе могут также реализовываться следующие функции:

- прием, обработка, архивирование и представление информации персоналу (агент мониторинга состояния окружающей среды и внутреннего состояния энергосистемы с использованием базы знаний)
- формирование эталонной модели текущего режима (агент формирования прогнозирующей эталонной модели)
- выявление опасного отклонения состояния от прогнозируемого состояния эталонной модели и его локализация (агент прогноза опасного состояния энергосистемы),
- прогноз потенциальной аварийной ситуации (агент ассоциативного поиска прецедента).

Для поддержания заданного уровня степени устойчивости применяются технологии:

- мониторинга степени статической устойчивости электрической сети в реальном масштабе времени, обнаружения и локализации критического сечения сети
- адаптивного векторного автоматического управления устройствами FACTS с использованием информации СМПП путем мониторинга и управления демпфированием опасных низкочастотных колебаний в ЕНЭС.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Rehtanz, C. Autonomous Systems and Intelligent Agents in Power System Control and Operation. Springer-Verlag, New York, 2003.
- [2] Pourbeik, P., Bahrman, M., John, E., and Wong, W. Modern Countermeasures to Blackouts, IEEE Power & Energy Magazine. 2006. No 5. P. 36–45.
- [3] Khosrow Moslehi, Ranjit Kumar. Vision of a self-healing power grid // ABB Review 4/2006. P. 21-25
- [4] Швецов А.Н. Агентно-ориентированные системы: от формальных моделей к промышленным приложениям // <http://window.edu.ru/library/pdf2txt/179/56179/27142/page9>
- [5] The National Grid Company. http://www.nationalgrid.com/uk/library/documents/sys_03/default.asp.
- [6] Bricker S, Gonen T, Rubin L (2001) Substation automation technologies and advantages. IEEE Computer Applications in Power 14 (3):31–37.
- [7] Preiss O, Wegmann A (2001) Towards a composition model problem based on IEC61850. Proceedings of the 4th ICSE Workshop on Component-based Software Engineering, Toronto, Canada. http://www.sei.cmu.edu/pacc/CBSE4_papers/PreissWegmann-CBSE4-4.pdf.
- [8] Nagata T, Nakayama H, Utatani M, Sasaki H. A multi-agent approach to power system normal state operations. In 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 3:1582–1586.
- [9] Vishwanathan V, McCalley J, Honavar V. A multiagent system infrastructure and negotiation framework for electric power systems. Proceedings of 2001 IEEE Porto Power Tech Conference, 1 Porto, Portugal.
- [10] Buse D.P., Wu Q.H. IP Network-based Multi-agent Systems for Industrial Automation Information Management, Condition Monitoring and Control of Power Systems. – London: Springer-Verlag, 2007. – 178 p.