



МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТЬЮ БОЛЬШИХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ: КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПОДХОД

Ю.И. Моржин, М.А. Рабинович (НТЦ ОАО ФСК),
И.Б. Ядыкин, Н.Н. Бахтадзе (ИПУ РАН)

Представлены концепция разработки интеллектуальной мультиагентной системы предотвращения потери устойчивости в системе управления электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС) и новые алгоритмы определения степени устойчивости электроэнергетической системы на основе метода грамианов.

Ключевые слова: интеллектуальная мультиагентная систем, потеря устойчивости, электроэнергетическая система, метод грамианов, агент.

В 2011 г. ОАО ФСК РФ была утверждена Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью (Концепция ИЭС ААС), разработанная учеными и специалистами ОАО «ФСК ЕЭС», ОАО «СО ЕЭС», ОАО «НТЦ электроэнергетики», ИПУ РАН и др. В документе подчеркивается, что современная система управления Единой национальной (общероссийской) электрической сетью (ЕНЭС) должна быть интеллектуальной в динамическом аспекте. Результат настройки моделей (энергообъектов, фрагментов либо энергосистемы в целом) позволяет формировать рекомендуемые управляющие воздействия, которые могут быть использованы как в системах автоматического и автоматизированного управления ТП, так и в системах глобального контроля и управления энергосистемой – в качестве поддержки принятия управленческих решений [1]. Эффективность сетевого автоматического управления частотой и мощностью предполагает оптимизацию режимов работы энергообъектов при обеспечении надежного функционирования и поддержку частоты на заданном уровне.

Предложенные ИПУ РАН [2] интеллектуальные методы идентификации нелинейных динамических моделей позволяют прогнозировать состояние энергообъектов в условиях априорной неопределенности с высокой точностью. Настройка алгоритмов осуществляется по данным функционирования энергообъектов в режиме РВ. Прогнозирующая модель нелинейного динамического объекта разрабатывается на основе интеллектуальных алгоритмов с использованием формализма нечеткой логики и мультиагентной технологии.

Применение мультиагентных систем в управлении энергообъектами

Мультиагентные системы (МАС) представляют собой новую генерацию ПО, активно развивающуюся в последнее десятилетие. Технологии МАС сочетают объектно-ориентированное программирование, системы искусственного интеллекта и телекоммуникаций. Основу МАС составляют программные модули, получившие название агентов. Агент, оперативно анализирующий ситуацию,

принимающий решения и креативно взаимодействующий с другими агентами, называется интеллектуальным.

В классическом подходе к созданию ПО решение какой-либо задачи (зачастую многокритериальной) сводится к построению некоторой одной интеллектуальной системы, которая, имея в своем распоряжении все необходимые знания, способности и вычислительные ресурсы, способна решить некоторую глобальную проблему.

Особенность мультиагентных технологий заключается в принципиально новом подходе к решению раз-

ИПУ РАН с 2008 г. является участником международного консорциума проекта ICOEUR (Intelligent Coordination of Operation and Emergency Control of EU and Russian Power Grids – Интеллектуальная координация оперативного и противоаварийного управления электрических сетей ЕС и России) FP7 Programm. Результаты этих исследований вошли в эскизный и технический проекты НИОКР “Разработка оборудования и систем управления для крупных энергетических систем” по госконтракту 02.521.11.0004 (раздел “Разработка ПО АПК управления нормальными и аварийными режимами большого энергообъединения” в части: Расчетный сервер – блок динамической устойчивости “Разработка алгоритмов и методов системы управления режимами”).

В проекте ICOEUR ИПУ является лидером выполненных задач:

- Задача 3.2.3 Динамическая оценка состояний больших электрических сетей – алгоритмы интеллектуальной идентификации. Глава в международном отчете по третьему рабочему пакету.
- Задача 4.1.1 Методология оценивания риска потери устойчивости. Глава в международном отчете по четвертому рабочему пакету.
- Задача 4.1.2. Проектирование робастного адаптивного регулятора для демпфирования межрайонных колебаний в электроэнергетической системе. Глава в международном отчете по четвертому рабочему пакету.

ОАО “НТЦ ФСК ЕЭС” и ИПУ РАН участвовали в разработке концепции и теоретических основ ИЭС ААС в 2010–2011 гг. Разработаны: концепция (Том 2, 5, 6, Сводный том) и теоретические основы управления интеллектуальной энергетической системой России (отчеты 1–7).

Разработаны новые технологии: динамического оценивания ЭЭС; мониторинга степени статической устойчивости электрической сети в РВ; адаптивного векторного автоматического управления устройствами FACTS с использованием информации СМНР путем мониторинга и управления демпфированием опасных низкочастотных колебаний в ЕНЭС; управления спросом на электрическую и тепловую энергию (роботизированные торговые системы).

нообразных функциональных задач в системе управления сложным крупномасштабным объектом. В МАС считается, что один агент владеет всего лишь частичным представлением о глобальной проблеме, а значит, он может решить лишь некоторую часть общей задачи. В связи с этим для решения сложной задачи необходимо создать некоторое множество агентов и организовать между ними эффективное взаимодействие, что позволит построить единую МАС. В МАС весь спектр задач по определенным правилам распределяется между всеми агентами, каждый из которых считается членом организации или группы. Распределение заданий означает присвоение каждому агенту некоторой роли, сложность которой определяется исходя из возможностей агента.

Агент способен воспринимать свое окружение и изменять его своими действиями, симулировать реальные ситуации. Для оптимизации действий интеллектуальных агентов не требуется решение сложной многокритериальной задачи, сопряженной с необходимостью знать вероятностные характеристики реальных процессов для сложной многоуровневой иерархической системы. МАС по сути представляют собой самоорганизующиеся системы. При этом отдельные агенты способны инициировать диалог между собой в заранее не предписанные моменты времени, работать в условиях неопределенности и т. д., что предоставляет методологическую основу для реализации концепции предварийного управления крупной энергосистемой.

В настоящее время МАС нашли широкое применение в управлении энергообъектами в США, Японии, Индии, Китае и Евросоюзе. Передовые разработки проводятся в России в Институте систем энергетики им. Л. А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН, в частности, по оцениванию состояния электроэнергетических систем (ЭЭС) на основе мультиагентных технологий.

Такие системы активно внедряются в целом ряде задач энергетики, достаточно широкий обзор их применения представлен, например, в [1]. Однако нет прецедента их применения для создания глобальной системы управления энергосистемой, хотя такой подход представляется более чем естественным.

Разработка МАС для интеллектуального управления активно-адаптивными сетями в глобальном масштабе позволит создать гибкий инструментарий управления, содержащий модули, обладающие масштабируемостью, мобильностью, интероперабельностью, что важно при разработке систем, основанных на знаниях. Решение технологических задач будет осуществляться путем распределенных переговоров программных агентов, работающих автономно и параллельно, и действующих от лица и по поручению более высокого уровня, а не путем построения одного общего последовательного алгоритма, комбинаторно перебирающего варианты решения проблемы. Такая архитектура обеспечит сочетание иерархического и децентрализованного подходов к организации управления интеллектуальными сетями.

Применение МАС в области управления глобальными энергосетями обеспечит интеллектуальную поддержку принятия решений по обеспечению надеж-

ности функционирования, согласованных для всей ЕНЭС, на всех уровнях, а также оптимизировать экономические показатели процессов выработки и потребления электроэнергии. Формируемые на базе интеллектуальных алгоритмов идентификации управления в РВ смогут быть использованы как в режиме автоматического управления, так и в режиме поддержки принятия решений.

Применение интеллектуальных агентов обеспечивает новое качество электроэнергетических систем: свойство инфраструктурной устойчивости – способности самовосстановления после возникновения и развития каскадных аварий. В то же время, МАС может быть использована для определения степени устойчивости ЭЭС, должна стать одним из основных элементов системы раннего предупреждения об угрозе потери устойчивости ЭЭС.

Проблема определения степени устойчивости ЭЭС

Нестабильность режима по напряжению сегодня рассматривается как главный механизм, приводящий к лавине напряжений и каскадной аварии. Статистические данные по каскадным авариям в США и Канаде свидетельствуют, что среди всех аварий за период 1965–1987 г. в 17 авариях отмечалась неустойчивость режима по напряжению (Taylor, 1994 г.). Другой проблемой являются опасные низкочастотные колебания, обусловленные слабо-демпфированными модами ЭЭС и ее резонансными свойствами. Если в энергосистеме происходит возмущение, вызванное потерей генерации или отключением линии, то в ней возникают резонансные явления, приводящие к росту амплитуды и уменьшению демпфирования этих колебаний

Проблема определения степени устойчивости ЭЭС и мониторинга локальных или межрайонных колебаний известна в мировой науке более 50 лет и до сих пор не потеряла своей актуальности. Исследования в этой области концентрировались в основном вокруг прямого метода Ляпунова, модального анализа и исследований собственных чисел характеристических уравнений матриц математических моделей ЭЭС. Использовались многие математические методы и их различные комбинации.

В группе спектральных методов – это метод Альберти, метод вычисления доминирующих полюсов спектра, метод матричных сигнум-функций. В группе методов модального анализа – это Прони анализ, рекурсивный робастный метод наименьших квадратов, алгоритмы Юла-Уокера, вейвлет анализ, нейронные сети и генетические алгоритмы.

Однако практическое значение всех упомянутых исследований в значительной степени ограничено в первую очередь из-за того, что математические модели ЭЭС сложны: они нелинейные, нестационарные и распределенные, включают различные описания для медленных и быстрых процессов. Каждый из методов имеет ограниченное применение и эффективен только для определенных режимов системы. Возникают большие проблемы вследствие высокой размерности математических моделей ЭЭС и необходимостью решения задач высокой размерности в РВ.

Метод грамианов определения степени статической устойчивости

Для оценки степени статической устойчивости ЭЭС в отчете НТЦ ФСК ЭЭС и ИПУ РАН [4] предложен метод грамианов, основанный на новом математическом подходе к решению дифференциальных и алгебраических уравнений Ляпунова и Сильвестра, разработанном в ИПУ РАН для анализа степени устойчивости линейных динамических систем. Метод основан на разложении матрицы грамиана, являющегося решением уравнений Ляпунова или Сильвестра, по спектру матриц, формирующих эти уравнения.

Для анализа устойчивости дифференциально-алгебраической системы уравнений ЭЭС используется метод вычисления грамиана системы в РВ, а также асимптотические свойства нормы Фробениуса грамиана, которая стремится к бесконечности при приближении вещественной части любого корня характеристического уравнения системы к нулю.

Технологии поддержания заданного уровня степени устойчивости

Для поддержания заданного уровня степени устойчивости применяются технология мониторинга степени статической устойчивости электрической сети в РВ, обнаружения и локализации критического сечения сети и технология адаптивного векторного автоматического управления устройствами FACTS¹ с использованием информации системы мониторинга переходных режимов (СМПР).

Последняя из перечисленных технологий при реализации в соответствии с мультиагентным подходом осуществляет стабилизацию запасов статической устойчивости в энергосистеме в РВ путем мониторинга и автоматического управления демпфированием мод опасных низкочастотных колебаний на основе адаптивного векторного управления устройствами FACTS, размещаемыми в энергосистемах, примыкающих к месту возникновения угрозы нарушения устойчивости.

Технология предусматривает выполнение следующих функций.

- прием, обработка, архивирование и представление информации персоналу (текущие значения напряжения и реактивной мощности).
- формирование локального адаптивного управления устройствами FACTS.
- формирование вектора координирующего адаптивного управления (на основе информации от СМПР) интеллектуальных мультиагентных систем для географически близких энергосистем.
- адаптивная стабилизация запасов статической устойчивости в РВ с контролем параметров опасных низкочастотных колебаний (агент адаптивной стабилизации запаса статической устойчивости).
- мониторинг запасов статической устойчивости в РВ, значений частоты и степени демпфирования низкочастотных колебаний (агент вычисления запаса

статической устойчивости в РВ, частоты и степени демпфирования опасных межрайонных колебаний).

Предполагается, что за счет применения этой технологии можно будет существенно расширить пропускную способность в контролируемых сечениях сети.

Интеллектуальная система поддержания заданного критерия надежности ЭЭС «N-K»

Поддержание требуемого уровня степени устойчивости электроэнергетической системы позволяет обеспечить удовлетворение заданному критерию надежности. Соответствующая подсистема интеллектуальной системы управления реализует:

- мониторинг текущего состояния надежности ЭЭС с помощью цифровой моделирующей платформы РВ;
- диагностику состояния, выявление и локализацию одновременного выхода из строя к энергообъектов;
- автоматическое самовосстановление нормального режима ЭЭС.

Основными функциями системы являются:

- прием, обработка, архивирование и представление информации персоналу (текущие значения напряжения, активной и реактивной мощности, получаемые от СМПР, АСУТП и др.);
- формирование вероятностной математической модели электрической сети с примыкающей распределенной генерацией и потребителями, вычисление текущих показателей надежности ЭЭС (агент формирования показателей надежности);
- автоматическая адаптация параметров модели к текущему режиму (агент настройки параметров модели);
- верификация модели в РВ (агент верификации модели);
- подготовка информации для интеллектуального решателя задачи самовосстановления режима и доведения показателей надежности до требуемых значений;
- решение задач самовосстановления режима (агент интеллектуального решателя задачи самовосстановления режима);
- инициация команд на включение автоматических систем реконфигурации ЭЭС (агент реконфигурации режима ЭЭС).

Агент (МАС) интеллектуального решателя задачи самовосстановления режима

Данная подсистема может быть реализована на основе децентрализованных систем сетевого управления (ДССУ) с использованием сетевых кластеров. Каждый сетевой кластер состоит из децентрализованной вычислительной части, телекоммуникационной сети, содержащей общую шину, информационной части, исполнительных органов (агентов первого уровня). Будем считать, что децентрализованная часть представляет собой совокупность многопроцессорных вычислительных комплексов, состоящих из большого числа одинаковых процессоров, связанных с общей шиной при помощи контроллеров коммутационной сети.

¹ FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) - комплекс технических и информационных средств автоматического управления параметрами линий электропередач.

Если в энергосистеме вышли из строя одновременно несколько энергообъектов, то ее самовосстановление возможно, если в энергосистеме в режиме нормальной эксплуатации предусмотрены горячие резервы активной и/или реактивной мощности, а также запасы по пропускной способности в соответствующих сечениях сети.

Агент (МАС) интеллектуального решателя задачи самовосстановления режима непрерывно обновляет свою базу знаний с целью формирования текущей и эталонной модели энергосистемы. Этот агент выполняет роль локального диспетчерского центра МАС и решает следующие задачи:

- 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);
- планирование процесса реконфигурации системы управления.

Очевидно, что для самовосстановления интеллектуальной энергосистемы следует передать нагрузки отказавших энергообъектов источникам генерации, в которых имеются соответствующие резервы активной и/или реактивной мощности при условии, что в сечениях сети, связывающих эти нагрузки с новыми источниками генерации, имеются резервы по пропускной способности всех указанных сечений. Необходимые резервы могут быть получены за счет использования интеллектуальной системы поддержания заданной степени устойчивости и самовосстановления ЭЭС.

В отказавших энергообъектах функционируют вполне работоспособные децентрализованные системы сетевого управления ДССУ, которые не привязаны к ДССУ исправной части энергосистемы. Самовосстановление энергосистемы можно осуществить двумя способами: а) перебросить каналы связи отказавших энергообъектов на соответствующие исправные энергообъекты, поэтому реконфигурацию системы управления можно ограничить реконфигурацией сети связи; б) использовать мультиагентные технологии, в этом случае реконфигурация сети связи не потребуется.

Агент (МАС) реконфигурации режима ЭЭС

Агент решает следующие задачи:

- 1) определение номеров исправных и отказавших процессорных устройств;
- 2) определение резервных процессорных устройств ДССУ исправной части энергосистемы;
- 3) передача по коммуникационной сети исходных кодов ДССУ отказавшей части в резервные процессорные устройства ДССУ исправной части энергосистемы;
- 4) возобновление процесса управления энергосистемой.

Существуют следующие способы обеспечения устойчивости ДССУ к отказам процессорных устройств: резервная производительность процессорных устройств; резервирование процессорных устройств; смешанный вариант обоих способов. Повышение вероятности безотказной работы коммутационной сети достигается в основном за счет использования различных вариантов резервирования каналов связи.

Заключение

Разработка и внедрение МАС на этапах раннего предупреждения об угрозе потери устойчивости ЭЭС на основе предложенных математических методов обеспечит расширение пропускной способности сети не менее чем на 3%. Это принесет сетевой компании значительный экономический эффект в виде дополнительной прибыли, экономии капитальных вложений в строительство и модернизацию сетей, платы за оказание дополнительных системных услуг. Кроме того, будет достигнуто снижение потерь активной мощности в электрической сети, расширение области допустимых режимов за счет уточнения предельных перетоков и повышение управляемости системы и как следствие — надежности режимов.

Создание программного сенсора определения места возникновения угрозы потери устойчивости и степени устойчивости ЭЭС в РВ позволит приступить к решению следующих технологически важных новых задач:

- создание адаптивной автоматической системы векторного управления демпфированием опасных низкочастотных колебаний электрической сети;
- разработка методики и программы расчетов уставов релейной защиты и противоаварийной автоматики (ПАУ) в РВ;
- создание нового поколения мультиагентных систем противодействия нарушению устойчивости — интеллектуальных адаптивных систем поддержания гарантированной устойчивости ЭЭС.

Список литературы

1. Моржин Ю.И., Шакарян Ю.Г., Кучеров Ю.Н., Вороний Н.И., Васильев С.Н., Ядыкин И.Б. Smart Grid concept for Unified National Electrical Network of Russia/CD. Preprints of proceedings of IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe 2011, Manchester Dec. 5–7 2011. Manchester, GB: IEEE, The University of Manchester, 2011. Panel session 5D.
2. Бахтадзе Н.Н., Кульба В.В., Лотоцкий В.А., Максимов Е.М., Ядыкин И.Б. Specific Approach to the Coordination of the Power Generating Units Control and Cybernetics. Warsaw: Systems research Institute Polish Academy of Sciences. 2010. V. 39. № 1. 2010.
3. Бахтадзе Н.Н., Кульба В.В., Лотоцкий В.А., Максимов Е.М., Ядыкин И.Б. Identification methods based on associative search procedure//Control and Cybernetics. 2011. V. 2. № 3.
4. Суханов О.А., Новицкий Д.А., Ядыкин И.Б. Method of Steady-state Stability Analysis in Large Electrical Power Systems/Proceedings of 17-th Power Systems Computation Conference 2011 PSCC2011. Stockholm: Curran Associates, Inc. 2012. T. 2.

Моржин Юрий Иванович — д-р техн. наук, зам. ген. директора,

Рабинович Марк Аркадьевич — зав. отделом ОАО «НТЦ электроэнергетики» (НТЦ ОАО ФСК),

Ядыкин Игорь Борисович — д-р техн. наук, проф., зав. лабораторией,

Бахтадзе Наталья Николаевна — д-р техн. наук, проф., зав. лабораторией ИПУ РАН.

Контактные телефоны: (495) 334-90-31, 334-92-01.

E-mail: Jad@ipu.ru bahfone@ipu.ru. Http://www.ntc-power.ru http://www.ipu.ru