

*Новейшие методы и методики исследований, используемые авторами в своей научной деятельности:*

Методы гибридного моделирования, методы численного интегрирования, метаэвристические методы оптимизации, широко использовались исследовательские методы; методы эмпирического исследования (наблюдение, сравнение, измерение, эксперимент), методы теоретического исследования (абстрагирование, анализ и синтез, и др.).

Методы высокоскоростной видеорегистрации быстропротекающих процессов с применением программно-аппаратных комплексов для автоматического анализа размеров, скоростей, траекторий движения мелкодисперсных объектов.

Методы бесконтактной трассерной визуализации PIV, StereoPIV, IPI, SP для установления характеристик фазовых превращений при нагреве жидкостей и оттока газообразных продуктов испарения. Данные методы основаны на применении импульсных лазеров, кросскорреляционных камер, специализированного программного обеспечения и другого вспомогательного оборудования. Суть методов заключается в непрерывном контроле поля скорости жидкости и газа по скоростям перемещения трассирующих частиц.

## **К ВОПРОСУ НАСТРОЙКИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ РАЗЛИЧНОГО УРОВНЯ В СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

**Аскаргов А.Б.<sup>1,2</sup>, Литвинов С.А.<sup>2</sup>, Воронин С.В.<sup>2</sup>**

Научный руководитель доцент Андреев М.В.

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

<sup>2</sup>*Ямбургское районное энергетическое управление ООО «Газпром добыча Ямбург», г. Новый Уренгой, Россия*

Современные направления развития электроэнергетической отрасли подразумевают широкомасштабное внедрение новых низкоуглеродных или безуглеродных объектов генерации, основанных, в частности, на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ); применение гибридных систем электроснабжения на переменном и постоянном токе; установку в электрических сетях управляемых устройств компенсации, реализованных с применением силовой полупроводниковой техники и др. [2] Общим свойством для обозначенных новых устройств и систем является использование в их составе силовых преобразователей (СП) электрической энергии (инверторов и выпрямителей), обладающих совершенно иными свойствами и принципом функционирования в сравнении с традиционным оборудованием (например, синхронными генераторами). Наличие СП позволяет осуществить развязку, например, объекта генерации и основной электрической сети. Подобные изменения в структуре и, как следствие, свойствах современных электроэнергетических систем (ЭЭС) сильно сказываются на характере протекания процессов в них, а также на динамике функционирования различного оборудования [5].

При этом, учитывая единство процесса производства, трансформации, передачи, распределения и потребления электрической энергии, происходящие изменения затрагивают в общем случае всю ЭЭС. В результате возникает актуальная задача, связанная с настройкой систем автоматического регулирования (САР) и управления (САУ) оборудования в современных ЭЭС, которая является наиболее адекватной реальным условиям функционирования, а также обеспечивает устойчивое и надежное функционирование ЭЭС в целом. Настройка должна выполняться для систем различного уровня: агрегатного, станционного и системного (например, автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов, систем управления солнечной электростанцией и централизованных систем автоматического регулирования частоты и перетоков активной мощности). Для осуществления подобной настройки необходимым становится решение ряда вопросов, относящихся к проведению комплекса исследований на примере конкретного оборудования и ЭЭС, по результатам которого определяется эффективность выбранных параметров настройки [4].

Первым из таких вопросов является выбор способа проведения исследований, которые могут осуществляться либо в реальной ЭЭС, либо на ее физической или математической модели. Однако известная специфика и сложность ЭЭС исключают возможность получения всей необходимой для настройки САР и САУ информации, особенно аварийного характера, натурным путем. Зачастую натурные испытания проводятся только при проверке уже настроенного оборудования с целью оценки его готовности к работе в составе реальной энергосистемы. Таким образом основным способом является применение физического или математического моделирования. Физическое моделирование позволяет учесть реальные свойства объекта моделирования и достаточно адекватно воспроизвести все протекающие процессы, однако оно обладает рядом ограничений, преимущественно связанных с размерностью воспроизводимой модели ЭЭС, детализацией моделей ее отдельных элементов и спектром возможных аварийных режимов, а адекватное воспроизведение большого количества новых объектов с СП на физической модели ЭЭС в настоящее время является существенно затратным и трудно реализуемым.

При этом физические испытательные стенды широко применяются при проведении предварительных исследований и испытаний новых схемно-алгоритмических решений в структуре САР и САУ. В результате наиболее широкое распространение получает математическое моделирование ЭЭС. Вторым вопросом как в случае физического моделирования, так и математического моделирования является выбор масштаба модели и уровень ее детализации, при этом также выбирается уровень детализации моделей отдельных элементов ЭЭС.

В общем случае воспроизведение наиболее полной модели ЭЭС, отражающей структуру и топологию системообразующих и распределительных сетей, узлов генерации и нагрузки, позволяет достигнуть адекватных и

достоверных результатов моделирования, однако подобный подход является невозможным, что во многом связано с ограниченными возможностями средств моделирования.

Следовательно, при моделировании зачастую прибегают к введению определенных ограничений и допущений [3], связанных, например, с эквивалентированием и упрощением сложных электрических сетей, представлением электрических станций с множеством источников в виде одного эквивалентного источника, использованием обобщенной модели нагрузки, исключением измерительных преобразователей и др. Подобное оказывает значительное влияние на полноту и достоверность расчетов режимов и процессов в реальных ЭЭС, что в свою очередь влияет на конечную настройку различных САР и САУ. Вопрос выбора масштаба воспроизводимой модели ЭЭС является сложной экспертной задачей, поскольку при значительном эквивалентировании может теряться влияние отдельных элементов или их групп на режимы и процессы, происходящие в ЭЭС. Третий вопрос связан с выбором типа математической модели и подхода к ее решению. При выполнении процедуры настройки САР и САУ используются динамические и статические (линеаризованные) математические модели ЭЭС. Совместное использование данных моделей подразумевает определение первоначальных настроек с помощью статической модели, а затем их проверка и по необходимости корректировка с помощью динамической модели. Для решения статической модели ЭЭС и, соответственно, нахождения параметров настройки используются различные подходы и методы: метод корневого годографа, модальный анализ, метод *D*-разбиения и др. Линеаризация модели приводит к значительным упрощениям и ухудшению точности моделирования, однако позволяет рассматривать модель ЭЭС значительной размерности и применять широкий математический аппарат с целью нахождения наиболее оптимальной настройки САР и САУ в соответствии с заданными критериями. Для решения динамической модели ЭЭС используются различные численные методы решения систем дифференциальных и алгебро-дифференциальных уравнений в зависимости от используемых средств моделирования. Четвертый вопрос заключается в выборе инструментов для проведения исследований на математической модели ЭЭС. Как было обозначено, динамическая модель ЭЭС может воспроизводиться с помощью разных специализированных средств моделирования, среди которых различают цифровые программно-вычислительные комплексы (ПВК) моделирования электромеханических переходных процессов, а также цифровые программно-вычислительные и программно-аппаратные комплексы (ПАК) моделирования электромагнитных переходных процессов. Однако, несмотря на высокий уровень разработки данных средств, им присущи определенные упрощения и ограничения при решении совокупной математической модели ЭЭС, которые могут значительно сказываться на полноте и достоверности получаемой с помощью них информации, которая, в частности, необходима для настройки САР и САУ, а также дальнейшей оценки эффективности выбранных параметров.

Последнее становится особенно актуальным в условиях развития современных ЭЭС, сопровождающегося внедрением все большего количества объектов с СП. С одной стороны, данные вопросы связаны с необходимостью воспроизведения совокупной модели ЭЭС большой размерности, с другой – с необходимым и достаточным уровнем детализации математических моделей воспроизводимых элементов и ЭЭС в целом. В первом случае эффективными средствами являются ПВК моделирования электромеханических переходных процессов, однако в таком случае воспроизведение новых объектов с СП возможно только в виде обобщенных моделей с существенными ограничениями и допущениями. Во втором случае использование ПВК или ПАК моделирования электромагнитных переходных процессов позволяет рассматривать наиболее детальные модели элементов ЭЭС и учитывать все их особенности, тем не менее чем детальнее каждый рассматриваемый и учитываемый элемент в совокупной модели ЭЭС, тем меньше становится ее масштаб. Кроме обозначенных четырех вопросов при настройке САР и САУ также необходимо осуществить выбор исследуемых схемно-режимных условий; мест, типов и интенсивности возмущений; критериев оценки эффективности настройки и др.

Учитывая вышесказанное, для комплексного решения обозначенных вопросов, возникающих перед специалистами при настройке САР и САУ различного уровня в современных ЭЭС, в работе предлагается новый подход к проведению процедуры настройки. Данный подход заключается в выборе первоначальных параметров настройки с применением различных доступных методов решения статической модели ЭЭС (по аналогии с существующими подходами), а также в проверке и необходимой корректировке выбранных параметров настройки на детальной динамической модели ЭЭС с применением Всережимного моделирующего комплекса электроэнергетических систем реального времени (ВМК РВ ЭЭС) [1]. ВМК РВ ЭЭС представляет из себя программно-аппаратную платформу мультипроцессорного типа, основанную на гибридном подходе к моделированию ЭЭС. Гибридный подход (объединение аналогового, цифрового и физического моделирования) используется для представления и решения математических моделей элементов ЭЭС на отдельных специализированных процессорах, которые затем собираются в единую модель исследуемой ЭЭС в соответствии с ее топологией и составом.

Подобное решение позволяет воспроизводить модель ЭЭС большой размерности без значительного эквивалентирования, а также учитывать в данной модели детальные модели отдельных элементов без упрощений и ограничений, что особенно важно при рассмотрении современных ЭЭС с объектами, использующими СП, т.к. упрощенное представление самой динамики СП или части «за преобразователем» также приводит к упрощению САУ в подобной модели, что в совокупности сказывается на достоверности получаемых результатов моделирования при исследовании режимов и процессов для настройки САР и САУ данного или другого оборудования в электрической сети.

В результате предлагаемый подход в зависимости от поставленной задачи позволяет произвести экспериментальную настройку САР и САУ силового электрооборудования ЭЭС при рассмотрении необходимых схемно-режимных условий функционирования ЭЭС на основе наиболее адекватной и достоверной информации о процессах в современных ЭЭС.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, Госзадание «Наука» № FSWW-2020-0017.

Литература

1. Аскарлов А. Б., Суворов А. А., Андреев М. В. Применение всережимного моделирующего комплекса для энергосистем с распределенной генерацией //Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2019. – Т. 23. – №. 1 (144). – С. 75-89.
2. Ашинянц С. А. Некоторые тенденции развития мировой электроэнергетики //Электрические станции. – 2021. – №. 12. – С. 53-57.
3. Бердин А. С. и др. Обзор методов определения параметров моделей синхронных генераторов //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2020. – Т. 20. – №. 4. – С. 103-111.
4. Климова, Т. Г. Исследование автоматических регуляторов возбуждения синхронного генератора с различными сигналами каналов стабилизации по частоте [Текст] / Т. Г. Климова, О. О. Николаева // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2021. – № 2 (65). – С. 110–115.
5. Фролов М. Ю., Фишов А. Г., Эрдэнэбат Э. Совместимость динамических характеристик традиционной и электронной генерации в электроэнергетических системах //Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2019. – Т. 23. – №. 6 (149). – С. 1175-1186.

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК НА БАЗЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЭНЕРГОРАЙОНАХ С ОБЪЕКТАМИ НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**Аскарлов А.Б., Суворов А.А., Андреев М.В.**

Научный руководитель профессор Гусев А.С.

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

В настоящий момент для обеспечения электроснабжения объектов нефтегазовой промышленности, многие из которых зачастую являются значительно удаленными от сетей централизованного электроснабжения, рассматриваются или уже применяются различные генерирующие установки (ГУ) на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), преимущественно основанные на использовании кинетической энергии ветра [2]. Причем также может подразумеваться применение гибридных систем электроснабжения [1]. Одной из особенностей современных ГУ на базе ВИЭ является применение в их составе силовых преобразователей (СП) на основе силовой полупроводниковой техники, с помощью которых осуществляется подключение ГУ к электрической сети. При этом помимо типа и технических характеристик СП важным аспектом является его система автоматического управления (САУ), которая определяет динамику его функционирования в целом. За счет системы управления определяются режим работы ГУ на базе ВИЭ, возможности ее участия в регулировании режима электрической сети (напряжения и частоты), характер динамического отклика при возмущениях, возможности работы как в изолированном (островном) режиме, так и параллельно с внешней сетью. Однако классический подход к формированию структуры САУ СП не всегда позволяет добиться желаемого результата [5]. Классическая САУ подразумевает, что объекты ВИЭ, как правило, работают в режиме выдачи максимально возможной активной мощности, при этом синхронизация с сетью осуществляется с помощью замкнутого контура регулирования фазы (ЗКРФ). Первое приводит к тому, что отсутствует какой-либо резерв активной мощности, следовательно, исключается возможность участия в регулировании частоты, а также, что подобные объекты генерации не используются при регулировании напряжения в электрической сети. Второе свойство классической САУ определяет, что СП работает в режиме ведомого сетью, поскольку входным сигналом для ЗКРФ является трехфазное напряжение в точке подключения ГУ к сети, на основе которого формируется опорное значение угла напряжения, необходимое для синхронизации. При этом существует проблематика обеспечения работы ГУ в изолированном режиме при использовании ЗКРФ, а также устойчивое функционирование ЗКРФ в условиях слабых сетей и при больших возмущениях. Последнее связано со значительной чувствительностью ЗКРФ к резким изменениям величины и фазы напряжения или их колебаниям.

В то же время при рассмотрении задачи осуществления надежного и бесперебойного электроснабжения объектов нефтегазовой промышленности необходимо обеспечивать устойчивую работу ГУ как при параллельной работе с внешней сетью, так и в изолированном режиме, а также возможность регулирования данными установками напряжения и частоты в электрической сети. Одним из наиболее перспективных решений в данном направлении является применение альтернативного подхода к формированию структуры САУ СП. Обозначенный подход заключается в переходе режима работы СП из ведомого в ведущий. При этом для реализации САУ с таким свойством может использоваться стратегия управления на основе виртуального синхронного генератора (ВСГ). С помощью СП, работающего в режиме ведущего, становится возможным значительно расширить перечень сетевых функций, которые он способен выполнять. Также в подобной САУ возможно управление ГУ как при параллельной работе с внешней энергосистемой, так и в изолированном или островном режиме без каких-либо значительных изменений в структуре или параметрах САУ СП. В настоящий момент предлагаются различные структуры САУ на основе ВСГ [4], однако для данных решений общим является использование жесткой последовательной структуры и направленности сигналов, которая копирует традиционные синхронные генераторы (СГ). В результате последовательной структуры воспроизводимая виртуальная машина становится ответственной за