

# ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ГЕНЕРАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

(ПО МАТЕРИАЛАМ СОВМЕСТНОЙ РАБОЧЕЙ ГРУППЫ (СРГ) CIGRE/CIREД C4-C6.35)

**УТЦ С.А.**, ОАО «Системный оператор Единой энергетической системы», Россия

**ДЬЯЧКОВ В.А.**, ОАО «Системный оператор Единой энергетической системы», Россия

**KOJI YAMASHITA**, Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan

**HERWIG RENNER**, Graz University of Technology, Austria

**SERGIO MARTINEZ VILLANUEVA**, Red Eléctrica de España, Spain

**JOSE CARVALHO MARTINS**, EDP Distribuicao – Energia, S.A., Portugal

**PETROS ARISTIDOU**, ETH Zürich, Switzerland

**THIERRY VAN CUTSEM**, University of Liège, Belgium

Существующие мировые тенденции, характеризующиеся увеличением объемов внедрения различных технологий генерации с использованием преобразовательной техники (преобразователей), в том числе на основе возобновляемых источников энергии (далее – ВИЭ), существенно различающихся по типу и номинальной мощности, приводят к необходимости решения актуальных вопросов математического моделирования указанного генерирующего оборудования при разработки математических моделей энергосистем для проведения расчетов переходных режимов и динамической устойчивости. Основная цель работы СРГ – создание руководящего документа, содержащего правила моделирования генераторов, использующих преобразователи, для проведения расчетов переходных процессов на основе существующего мирового опыта.

В настоящее время отсутствуют не только верифицированные динамические модели конкретных генерирующих установок, использующих преобразователи (фотоэлектрические панели (ФЭП), микротурбины, некоторые ветроэлектрические установки (ВЭУ) и другие), но также согласованная методология представления и эквивалентирования данных видов генерирующего оборудования при проведении исследований режимов и динамической устойчивости при аварийных возмущениях в передающих и распределительных

электрических сетях. Постоянное увеличение объема внедрения различных технологий генерации с использованием преобразователей также приводит к дополнительным сложностям при планировании и управлении электроэнергетическим режимом энергосистем для системных операторов передающей и распределительной электрической сети и при решении задач координации функционирования систем управления и регулирования.

Модели для расчета переходных процессов, используемые системными

операторами передающей сети для представления распределительных сетей, формируются как правило на базе ограниченного объема информации. В связи с этим для адекватного учета режимов работы генерирующего оборудования, присоединенного к распределительной сети при проведении расчетов переходных процессов в передающей сети, необходимо формирование корректной эквивалентной модели распределительной сети.

В последние годы достаточно активно осуществляется разработка моде-

лей для расчета переходных процессов для электростанций на базе ВИЭ, в первую очередь ВЭУ [1]. Вместе с тем, по мнению ведущих исследователей, на данный момент наиболее актуальным является продолжение исследований для ФЭП как наиболее динамично развивающейся технологии, а также других типов генерации с использованием преобразователей.

Учитывая изложенное, основные цели СРГ – решение следующих вопросов:

- проведение обзора существующих подходов и методов моделирования генерации с использованием преобразователей для расчета переходных процессов, а также определение состава необходимых параметров и характеристик генерирующего оборудования и преобразователей, необходимых для выполнения адекватного моделирования передающей или распределительной сети;
- выявление типов генерирующих технологий с использованием преобразователей, для которых в настоящее время отсутствуют или разработаны лишь частично (в недостаточном объеме) верифицированные математические модели;
- разработка рекомендаций по моделированию генерирующего оборудования с использованием преобразователей при расчете электромеханических (ЭМехПП) и электромагнитных (ЭМагПП) переходных процессов в передающей и распределительной сети;
- разработка рекомендаций по формированию эквивалентной математической модели электрической сети с подключенным генерирующим оборудованием, использующим преобразователи;
- проведение обзора потенциально новых характеристик работы энергосистемы, передающей и распределительной сети, прогнозируемых в результате

масштабного внедрения генерации с использованием преобразователей.

Для достижения этих целей СРГ выполняется анализ существующих методических рекомендаций, разработанных в международных и национальных рабочих группах, таких как МЭК, WECC, NERC, CIGRE, ENTSO-e. Кроме того, по инициативе СРГ был проведен информационный опрос компаний электроэнергетической отрасли из различных стран с целью изучения существующей мировой практики моделирования генераторов, использующих преобразователи, для расчета переходных процессов. Результаты указанного информационного опроса в настоящий момент анализируются и будут представлены в Техническом отчете.

На данный момент работа СРГ продолжается. Ниже более подробно представлены основные направления работы СРГ и полученные рабочей группой результаты.

### УСТОЙЧИВОСТЬ. ТЕРМИНОЛОГИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Необходимо отметить, что понятие и классификация устойчивости, используемые в российской практике, отличаются от соответствующих понятий и классификации, принятой зарубежными авторами и участниками СРГ.

В частности, в работах П. Кундура, вводятся такие понятия как:

- устойчивость по напряжению;
- устойчивость по частоте;
- устойчивость по углу ротора.

На рис. 1 приведена полная классификация устойчивости, принятая в [2].

В соответствии с [2], вышеуказанным видам устойчивости даются следующие определения:

- устойчивость по частоте – это способность энергосистемы поддержи-

## РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ

Ведущий рубрики



### Илюшин Павел Владимирович

Заместитель генерального директора – главный инспектор ЗАО «Техническая инспекция ЕЭС», к.т.н., руководитель подкомитета С6 «Системы распределения электроэнергии и распределенная генерация» РНК СИГРЭ, руководитель подкомитета ПК-5 «Распределенная генерация (включая ВИЭ)» ТК 016 «Электроэнергетика» Росстандарта

вать значение частоты электрического тока в допустимых пределах при возникновении в энергосистеме возмущения, приводящего к значительному небалансу генерации или нагрузке;

■ устойчивость по углу ротора – это способность синхронных машин, работающих в энергосистеме с единой частотой электрического тока, сохранять синхронную работу при возникновении возмущений в энергосистеме;

■ устойчивость по напряжению – это способность энергосистемы поддерживать на шинах объектов электроэнергетики при возникновении возмущений такие значения напряжения, при которых отсутствует «лавина напряжения» и не производится отключение нагрузки.

При рассмотрении устойчивости переходных процессов выделяются две стадии их протекания:



Рис. 1. Классификация видов устойчивости IEEE/CIGR

Таблица 1. Функциональные характеристики генераторов, использующих преобразователи, и традиционных синхронных генераторов

Функциональные характеристики	Виды устойчивости	Синхронный генератор с возможностью регулирования напряжения и частоты	Генератор, использующий преобразователь с минимальным набором функций	Генератор, использующий преобразователь, с современными функциональными возможностями
Инерция	Устойчивость по частоте	Да	Нет	Да, при условии наличия «виртуальной инерции»*
Первичное, вторичное и третичное регулирование		Да	Нет	Да, при условии наличия накопителя электрической энергии и/или соответствующей логики управления
Зона нечувствительности регулирования частоты		Да	Нет	Да, при условии наличия соответствующей логики управления
Регулирование напряжения сети	Устойчивость по напряжению	Да	Нет	Да, только генераторы большой мощности или электростанции с установленными устройствами СКРМ
Компенсация реактивной мощности		Да, в соответствии с PQ диаграммой	Нет	Да, только генераторы большой мощности в соответствии с PQ диаграммой, а также электростанции с установленными устройствами СКРМ
Возможность демпфирования колебаний	Устойчивость по углу ротора	Да, с использованием демпферной обмотки или системного стабилизатора**	Нет	Да, только при наличии системного стабилизатора
Возможность работы в переходных режимах	Устойчивость по частоте, устойчивость по углу ротора	Да	Нет	Да, в зависимости от типа источника энергии и логики управления
Возможность работы с перегрузкой (до нескольких секунд)	Различные	Да	Ограниченно	Да, только генераторы большой мощности

\* Виртуальная инерция – наличие накопителя электрической энергии с целью моделирования характеристик традиционного синхронного генератора и демпфирования колебания частоты

\*\* Системный стабилизатор (PSS): элемент или группа элементов, который обеспечивает дополнительный входной сигнал в автоматическом регуляторе возбуждения для улучшения демпфирования колебаний в энергосистеме

- быстрая динамика, оцениваемая по отклонению взаимных углов роторов генераторов в течение нескольких секунд;
- длительная динамика, характеризующаяся качаниями отдельных частей энергосистемы в течение интервала времени от десятков секунд до нескольких минут с частотами от нескольких десятков герца до нескольких герц.

Обращаясь к российской терминологической базе, можно отметить, что устойчивость нагрузки в целом достаточно точно соответствует «устойчивости по напряжению», а «устойчивости по углу ротора» в определенной степени соответствует круг вопросов, связанных с устойчивостью генерирующего оборудования электростанций [3].

Кроме того, следует дополнительно отметить, что в целях систематизации в работе СРГ принята следующая классификация генерирующего оборудования, использующего преобразователи:

- генерирующее оборудование без вращающихся частей (ФЭП и электрохимические генераторы);
- генерирующее оборудование с вращающимися частями (микротурбины, ВЭУ);
- накопители электроэнергии (аккумуляторные батареи большой мощности).

### УЧЕТ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ УСТОЙЧИВОСТИ

Математическая модель энергосистемы для расчета переходных процессов может быть представлена как совокупность следующих составляющих:

- модели отдельных видов оборудования;
- модели устройств управления и регулирования;
- эквиваленты, объем и степень подробности которых определяется в зависимости от целей расчетов и исследуемых процессов.

Определение функциональных характеристик генерирующего оборудования, использующего преобразователи, учет которых необходим при формировании математических моделей соответствующего оборудования – одна из базовых задач СРГ, успешность решения которой определяет возможность достижения заявленных целей исследования.

Изначально при присоединении к электрической сети генерирующего оборудования, использующего преобразователи, система их управления и регулирования разрабатывалась с минимальным набором функций. Генераторы отключались от электрической сети практически при любом аварийном возмущении в энергосистеме, что

дополнительно снижало надежность функционирования энергосистем, в особенности в условиях постоянного роста установленной мощности указанного генерирующего оборудования.

В целях повышения надежности функционирования энергосистем системные операторы стали устанавливать технические требования к соответствующему генерирующему оборудованию, включая их в действующие нормативные документы. К сожалению, несмотря на это в настоящее время значительная часть старого генерирующего оборудования, использующего преобразователи, работает без их соблюдения, в частности, в части сохранения возможности синхронной работы в энергосистеме при отклонениях частоты и напряжения. Современные генераторы, использующие преобразователи, конструируются таким образом, чтобы удовлетворять необходимым условиям работы в энергосистеме.

К основным функциональным возможностям современных генераторов, использующих преобразователи, относятся:

- регулирование частоты и напряжения;
- возможность работы в сложных переходных режимах;
- возможность демпфирования колебаний, и другие.

Указанные функциональные возможности обеспечиваются путем использования фазовой автоподстройки частоты (контур PLL), системы контроля максимальной мощности (MPPT), автоматики управления активной мощностью в зависимости от частоты и напряжения, наличием селективных устройств релейной защиты при КЗ или перегрузке оборудования и т.д.

Основные сравнительные характеристики традиционного генерирующего оборудования и генераторов, использующих преобразователи, представлены в Таблице 1. При формировании Таблицы 1 учитывалось, что современные генераторы, использующие преобразователи, могут также выполнять дополнительные функции, такие как:

- регулирование напряжения;
- регулирование частоты электрического тока;
- регулирование активной и реактивной мощности;
- функционирование при критически низких или высоких значениях напряжения или частоты, в том числе вследствие аварийных возмущений в энергосистеме.

Приведенная в Таблице 1 информация показывает, что при соблюдении всех требований генераторы, использующие преобразователи, по своим функциональным возможностям и характеристикам практически в полной мере соответствуют традиционным синхронным генераторам при использовании для них дополнительных устройств регулирования и управления, а также дополнительного оборудования.

### ФОРМИРОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГЕНЕРАТОРОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПРИ РАСЧЕТАХ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Процесс моделирования генераторов, использующих преобразователи различных типов, может быть унифицирован путем использования математических моделей отдельных модулей (элементов, устройств), в том числе показанных на рис. 2.

При проведении расчетов переходных режимов и динамической устойчивости необходимости в детальном моделировании характеристик первичного источника энергии как правило отсутствует. Однако поскольку используемые си-

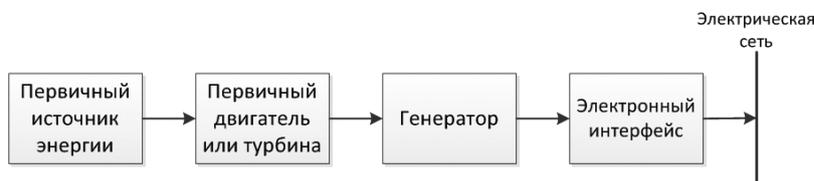


Рис. 2. Основные модули генераторов, использующих преобразователи

стемы управления и регулирования, а также функциональные характеристики генераторов, использующих преобразователи, могут существенно зависеть от типа первичного источника энергии, в некоторых случаях подобное моделирование может оказаться необходимым. Таким образом, в общем случае при моделировании генераторов, использующих преобразователи, основными являются три модуля:

- первичный двигатель или турбина;
- электрический генератор;
- электронный интерфейс, отвечающий за все функции управления и регулирования.

СРГ в рамках своей работы рассматривала модели генерирующего оборудования, используемые для расчета как ЭМехПП, так и ЭМагПП. Ниже рассмотрены каждая из указанных моделей.

### МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

По сравнению с программами для расчета ЭМехПП, в которых электрическая сеть представляется схемой замещения прямой последовательности и комплексными векторными уравнениями, программы расчетов ЭМагПП оперируют дифференциальными уравнениями для трехфазной электрической сети. Это означает, что расчеты ЭМагПП позволяют с достаточной степенью точности учитывать нелинейные характеристики устройств, рассчитывать гармонические составляющие, подсинхронный резонанс<sup>1</sup>, грозовые перенапряжения и иные аналогичные процессы. Учитывая вышеуказанную область применения указанных программных комплексов, практически все они позволяют осуществлять точное моделирование функциональных и технических характеристик устройств силовой электроники. Таким образом, для генераторов, использующих преобразователи, расчет ЭМагПП может про-

водиться с использованием моделей устройств силовой электроники и коммутационной аппаратуры (тиристоров, транзисторов, диодов) в преобразователе, а также соответствующих систем управления, реализованных в соответствующих программных комплексах.

Исследования ЭМагПП проводятся для:

- исследования переходных процессов при осуществлении коммутаций;
- определения реакции преобразователей на короткие замыкания в электроустановке и энергосистеме;
- определение значений токов КЗ;
- расчета гармонических составляющих;
- решения задач координации РЗА.

Проведение исследований ЭМагПП не требуется при разработке технико-экономического обоснования проекта и является необходимым только на дальнейших стадиях проектирования. Однако создание математических моделей генерирующего оборудования, использующего преобразователи, для расчета ЭМагПП может потребоваться в следующих случаях:

- при проведении расчетов для энергосистемы со слабыми связями;
- при проведении расчетов для узлов энергосистемы с несколькими типами преобразователей;
- при необходимости определения детализированного алгоритма управления.

В зависимости от типа исследования модель генератора, использующего преобразователи, может включать различный набор моделей систем управления и регулирования. Различные варианты представления генераторов, использующих преобразователи, в программах расчета ЭМагПП будут описаны в Техническом отчете СРГ.

### МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Программные комплексы для расчета ЭМехПП обычно используют менее подробные математические модели оборуду-

<sup>1</sup> Резонанс в электроэнергетической системе, вызывающий колебания с частотой ниже номинальной

дования и устройств, чем программные комплексы для расчета ЭМагПП.

Модели для расчета ЭМехПП могут быть использованы для:

- исследований быстрой и медленной устойчивости по напряжению;
- исследований устойчивости по углу ротора;
- исследований устойчивости по частоте;
- разработки мероприятий по улучшению устойчивости при малых возмущениях.

В отличие от исследований ЭМагПП, для проведения анализа переходных режимов и динамической устойчивости как правило отсутствует необходимость моделирования коммутирующих устройств в преобразователях из-за малого времени их срабатывания по сравнению с длительностью исследуемого переходного процесса. Следовательно, целесообразно учитывать в математической модели только частотные характеристики преобразователя, оказывающие наибольшее влияние на функционирование систем управления и регулирования преобразователей.

Математическая модель генератора, использующего преобразователь, для расчета ЭМехПП должна включать в себя модель источника энергии (турбины, фотоэлектрической панели и др.), модель преобразователя, модель устройств регулирования и управления, а также модели устройств РЗА.

Более детально компоненты модели будут описаны в Техническом отчете СРГ.

### ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ГЕНЕРАТОРОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

К одному узлу энергосистемы могут быть подключены генераторы, использующие преобразователи разного типа и мощности. Увеличение их количества в энергосистеме делает практически невозможным и в ряде случаев нецелесообразным индивидуальное моделирование из-за трудности проведения и анализа результатов расчетов. Однако, поскольку различные типы генераторов и преобразовательных устройств могут по-разному функционировать при возникновении возмущений, одна из важнейших задач – определение необходимой детализации при формировании эквивалентных моделей генераторов, использующих преобразователи.

В процессе своей работы СРГ были сделаны следующие выводы:

- уровень детализации эквивалентом должен определяться типом и целями проводимых исследований, а также составом эквивалентируемых генераторов;
- необходимо формирование различных эквивалентов для проведения расчетов установившихся режимов и переходных процессов.

По данным WECC, ВЭС и СЭС могут быть смоделированы одномашинным эквивалентом при условии сопоставимости статических и динамических характеристик с представлением в явном виде электросетевых объектов электростанции (повышающих трансформаторов, линий электропередачи), а также СКРМ [4].

Эквивалентирование моделей генераторов, использующих преобразователи, должно выполняться с учетом характеристик систем управления и регулирования как отдельных генераторов, так и электростанций в целом.

Эквиваленты должны формироваться таким образом, чтобы учитывать возможные режимы управления активной мощностью действием устройств противоаварийной и/или режимной автоматики.

В настоящее время работа СРГ связана с рассмотрением следующих вопросов:

- определение детального перечня параметров и характеристик генераторов, использующих преобразователи и их систем управления и регулирования для построения агрегированной модели с учетом различных типов и производителей преобразовательных устройств;
- определение уровня подробности эквивалента распределительной сети с подключенными генераторами, использующими преобразователи, в том числе различных типов.

### ДАЛЬНЕЙШАЯ РАБОТА СРГ

Как было указано выше, основной целью работы СРГ – создание руководящего документа, содержащего правила моделирования генераторов, использующих преобразователи, для проведения расчетов переходных процессов на основе существующего мирового опыта.

Ожидается, что результаты работы СРГ, обеспечат возможность решения следующих актуальных вопросов:

- какие функциональные характеристики генераторов, использующих преобразователи, необходимо учитывать при

моделировании для расчета переходных процессов в сравнении с существующими синхронными генераторами;

- какие функциональные характеристики генераторов, использующих преобразователи, необходимо учитывать при проведении конкретных типов исследований;
- каким образом осуществлять моделирование необходимых функциональных характеристик генераторов, использующих преобразователи;
- каким образом должно выполняться эквивалентирование генераторов, использующих преобразователи.

Подходы к формированию математических моделей энергосистем в целом и каждой ее составляющей для расчета переходных процессов могут изменяться с течением времени. Технический отчет СРГ будет лишь первой ступенью в попытке собрать воедино все существующие подходы к моделированию генераторов, использующих преобразователи.

Финальный Технический отчет СРГ планируется представить в апреле 2017 года. С учетом дальнейших изменений подходов к моделированию генераторов, использующих преобразователи, данный Технический отчет планируется дополнять и актуализировать.

**Авторы благодарят Клауса Веннеманна (Amprion GMBH, Германия) за существенную помощь в работе СРГ.**

### ЛИТЕРАТУРА

1. «CIGRE Technical Brochure 328, Modeling and Dynamic Behavior of Wind Generation as it Relates to Power System Control and Dynamic Performance», Prepared by CIGRE WG C4.601, August 2007. www.e-cigre.org.
2. «Definition and classification of power system stability». P. Kundur, J. Paserba, V. Ajarapu, Goran Andersson, A. Bose, C. Ca izares, Nikos Hatziaargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, Thierry Van Cutsem, V. Vittal. Technical Report, Report of the joint IEEE/CIGRE joint Task Force, CIGRE publication, P. Kundur (convenor) – 2003.
3. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электроэнергетических системах, учебное пособие, – М.: Издательство «Омега-Л», 2013 – 384 с.
4. WECC Guide for Representation of Photovoltaic Systems In Large-Scale Load Flow Simulations. WECC Modeling and Validation Work Group. Western Electricity Coordinating Council: January 2011.