

Развитие технологий мониторинга и управления в ЕЭС России на базе системы мониторинга переходных режимов

А.В.ЖУКОВ, Е.И.САЦУК, Д.М.ДУБИНИН
ОАО «СО ЕЭС»
Россия
dubinin@so-ups.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Система мониторинга переходных режимов, векторные измерения параметров электрического режима, АС СИ СМПР, PMU, PDC, WAMS.

ВВЕДЕНИЕ

Создание Системы мониторинга переходных режимов Единой энергетической системы (СМПР ЕЭС) инициировано Системным оператором в 2005 году. На протяжении семи лет в ОАО «СО ЕЭС» ведется работа по развитию инфраструктуры системы, автоматизации процесса сбора данных, развитию задач и разработке приложений с применением синхронизированных векторных измерений в технологиях диспетчерского и автоматического управления [1, 2]. СМПР базируется на технологии векторных измерений, обеспечивающей регистрацию синхронизированных по времени измерений параметров электромеханических переходных режимов и вычисление взаимных углов векторов напряжения в однозначно определенные моменты времени благодаря использованию сигналов синхронизации глобальных навигационных спутниковых систем.

Особую актуальность развитие СМПР, известную за рубежом как WAMS (Wide Area Measurement System), приобретает при построении активно-адаптивной сети (Smart Grid). Реализация качественно нового функционирования активных элементов в электроэнергетике возможна только при интеграции технологии синхронизированных векторных измерений, выполняемых с более высокой точностью и дискретизацией по сравнению со стандартными средствами телеизмерений, с современными автоматизированными системами диспетчерского управления и системами автоматического противоаварийного управления.

Изучение мирового опыта показывает преимущества применения синхронизированных векторных измерений при решении существующих задач и создании новых алгоритмов автоматического и диспетчерского управления ЭЭС на основе существующей АСДУ с учетом новых возможностей и способов контроля и управления режимами. Качественно новая информация предоставляет специалистам дополнительный инструмент для решения задачи повышения надежности управления электрическими режимами энергосистемы [3, 4].

РАЗВИТИЕ СМПР В РОССИИ

ОАО «СО ЕЭС» является идеологом развития технологии в ЕЭС России по следующим основным направлениям:

- развитие аппаратной части:
 - создание первого отечественного регистратора СМПР в 2006 году (комплекс Smart-WAMS, ЗАО «РТСофт»);
 - объединение функций регистрации синхронизированных векторных измерений и аварийных событий на единой аппаратной платформе на базе регистратора ПАРМА РП 4.11 (ООО «ПАРМА»);
 - постоянное совершенствование функций и характеристик векторных измерительных преобразователей (PMU, Phasor Measurement Unit) в части повышения надежности, точности, увеличения частоты дискретизации измерений, расширения функциональности и т.д.;
 - создание и внедрение концентраторов векторных данных (Phasor Data Concentrator, PDC);

**Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем
Екатеринбург, 3 – 7 июня 2013 г.**

- разработка нормативной базы:
 - разработка Системных проектов развития СМПР в региональных энергосистемах;
 - определение критериев развертывания программно-технических комплексов (ПТК СМПР) на энергообъектах;
 - разработка типовых требований к развертыванию комплексов СМПР на энергообъектах;
- развертывание ПТК СМПР на энергообъектах (схема размещения регистраторов СМПР показана на рис. 1):
 - согласование проектной и рабочей документации;
 - участие в приемочных испытаниях комплексов СМПР в опытную и промышленную эксплуатацию;
 - контроль функционирования ПТК СМПР после ввода в эксплуатацию.

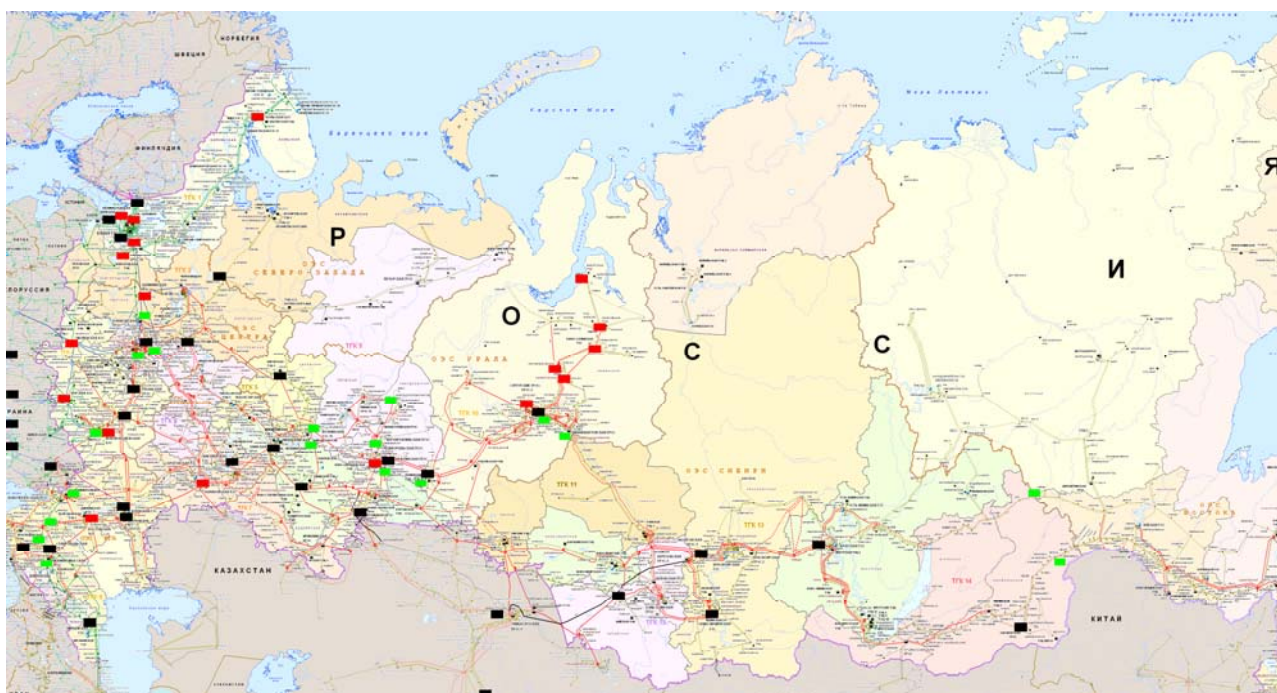


Рис.1. Схема размещения регистраторов СМПР в ЕЭС/ОЭС



- регистраторы (PMU), работающие в режиме on-line;
- регистраторы (PMU), работающие в режиме off-line;
- установка новых PMU в 2-х летней перспективе

- создание и внедрение в диспетчерских центрах ОАО «СО ЕЭС» Автоматической системы сбора информации с регистраторов СМПР (АС СИ СМПР);
- оптимизация информационного обмена технологической информацией между энергообъектами и диспетчерскими центрами;
- разработка приложений (программного обеспечения), применяющих данные СМПР, в том числе в режиме реального времени:
 - система мониторинга запасов устойчивости в северных районах Тюменской области (СМЗУ СРТО) [5];
 - система мониторинга системных регуляторов (СМСР) для обеспечения контроля функционирования систем возбуждения и автоматических регуляторов возбуждения генераторов электростанций [6];
 - ПО мониторинга низкочастотных колебаний в целях выявления низкочастотных колебаний в энергосистеме с идентификацией источника колебаний;
 - ПО визуализации динамики изменения режимных параметров в масштабах ЕЭС России;
 - ПО мониторинга относительного движения синхронных групп генераторов;
 - ПО мониторинга разделения энергосистемы на части.

**Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем
Екатеринбург, 3 – 7 июня 2013 г.**

- применение данных СМПР с целью повышения качества и надежности оперативно-диспетчерского управления в следующих задачах:

- оценивание состояния;
- верификация цифровых динамических моделей ОЭС [7, 8];
- анализ переходных процессов и причин технологических возмущений;
- мониторинг уровней устойчивости и выявление асинхронных режимов;
- мониторинг перетоков активной мощности в контролируемых сечениях, напряжений в узлах электрической сети;
- исследование динамических свойств ЕЭС и т.д.

В 2012 году в рамках развития технологии векторной регистрации в ЕЭС России ОАО «СО ЕЭС» инициировал и обеспечил выполнение следующих мероприятий:

- ввод в эксплуатацию ПТК СМПР Белоярской АЭС, Калининской АЭС, Курской АЭС, Нововоронежской АЭС, Смоленской АЭС, Ростовской АЭС, Ленинградской АЭС, Кольской АЭС, Сургутской ГРЭС-2, Краснодарской ТЭЦ;
- в рамках реализации пилотного проекта создания Системы мониторинга системных регуляторов установлены регистраторы СМПР на Северо-Западной ТЭЦ и произведена модификация ПО АС СИ СМПР в филиалах ОАО «СО ЕЭС» для обеспечения приема данных от СМСП энергообъектов;
- разработка ПО мониторинга низкочастотных колебаний. Работы по его интеграции в ПАК АС СИ СМПР запланированы на 2013-2014 г.г.;
- установка на Сургутской ГРЭС-2 концентратора векторных данных (впервые на энергообъекте ЕЭС) и обеспечение его взаимодействия с ПАК АС СИ СМПР Тюменского РДУ;
- проведение сравнительных испытаний векторных измерительных преобразователей СМПР 4-х отечественных разработчиков устройств на цифро-аналогово-физическом комплексе ОАО «НТЦ ЕЭС» [9];
- инициировано проведение испытаний векторных измерителей на их соответствие требованиям Стандарта С37.118-2011 на цифровом симуляторе RTDS (Real Time Dynamic Simulator).

В 2012 году число введенных в эксплуатацию комплексов возросло до 43 (количество РМУ увеличилось до 207). Также обеспечена возможность получения данных СМПР с регистраторов СМПР Украины и Казахстана. В период 2013-2014 г.г. также запланировано:

- внедрение ПТК СМПР на Белоярской АЭС-2, Конаковской ГРЭС, ТЭЦ-16 Мосэнерго, Невинномысской ГРЭС, Тюменской ТЭЦ-1, Воткинской ГЭС, Серовской ГРЭС, Нижневартовской ГРЭС, Калининградской ТЭЦ-2, а также на ряде подстанций ОАО «ФСК ЕЭС» в региональных энергосистемах;
- модернизация существующих комплексов СМПР ПС 1150 кВ Алтай, Саяно-Шушенской ГЭС, Загорской ГАЭС, Калининской, Курской, Нововоронежской, Ростовской и Смоленской АЭС.

По предварительной оценке к концу 2014 года комплексы СМПР будут развернуты более чем на 60 энергообъектах (до 300 РМУ), а в перспективе до 2020 года (табл.1) – на 200 энергообъектах ЕЭС (более 1000 РМУ).

Операционная зона	кол-во ЭО с ПТК СМПР	РМУ	кол-во ЭО с передачей инфо в on-line	перспектива развития до 2020 года
ОЗ ОДУ Северо-Запада	8	48	5	до 20 энергообъектов
ОЗ ОДУ Сибири	5	17	1	до 40 энергообъектов
ОЗ ОДУ Средней Волги	3	13	1	до 10 энергообъектов
ОЗ ОДУ Урала	13	45	8	до 60 энергообъектов
ОЗ ОДУ Центра	8	57	4	до 30 энергообъектов
ОЗ ОДУ Юга	6	27	1	до 30 энергообъектов
ОЗ ОДУ Востока	-	-	-	до 10 энергообъектов
ВСЕГО	43	207	20	до 200 энергообъектов

Табл. 1: Перспектива развития СМПР ЕЭС до 2020 года

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Внедрение АС СИ СМПР и наращивание сети установленных РМУ и концентраторов векторных данных обеспечивают техническую возможность применения данных синхронизированных векторных измерений в практических задачах. Очевидно, что данная технология предоставляет более точную (как по величине измеряемых величин, так и по синхронизации времени измерений) информацию по сравнению с существующими системами телеизмерений и основной задачей для развития и реализации ее потенциала является разработка новых и адаптация существующих приложений с целью улучшения надежности и качества управления энергосистемой.

Возможность использования синхронизированных векторных измерений для решения тех или иных задач критическим образом зависит от характеристик каналов передачи данных с уровня энергообъекта в центры обработки информации (диспетчерские центры ОАО «СО ЕЭС»). В связи с этим основные области применения данных СМПР условно разделены на две основных категории:

- аналитические и расчетные приложения с использованием архивной информации;
- задачи для мониторинга и управления режимами работы энергосистем в режиме реального времени.

Изучение мирового опыта по применению данных СМПР показывает, что технология WAMS предоставляет мощный инструмент в самых широких областях:

для диспетчера:

- управление перетоками с учетом низкочастотных колебаний;
- синхронизация частей системы после аварийного разделения на части;
- управление перетоками по относительному углу;
- предотвращение каскадных аварий;
- ситуационная осведомленность диспетчера (визуализация динамики изменения режимных параметров, интеграция результатов анализа с различными средствами визуализации);
- мониторинг устойчивости по напряжению;
- оценивание состояния;
- расчет и графическое отображение резервов реактивной мощности;
- мониторинг низкочастотных колебаний (определение параметров низкочастотных колебаний – энергии, доминантных локальных и межзональных мод и коэффициента демпфирования в целях информирования при приближении к опасным значениям).

для технологов (специалистов служб электрических режимов и релейной защиты и автоматики, проектировщиков):

- верификация расчетных моделей;
- повышение точности оценивания состояния;
- расследование аварий (пост-аварийный анализ), повышение качества расследования аварий благодаря высокой дискретизации и синхронизированности измерений;
- уточнение расчета максимально-допустимых перетоков;
- уточнение статических и динамических характеристик энергосистемы (в задачах регулирования частоты);
- мониторинг корректности работы системных регуляторов;
- разработка адаптивных защит;
- определение мест повреждения;

для специалистов сетевых компаний:

- уточнение параметров схемы замещения линий, диагностика состояния линий передач, увеличение пропускной способности сети, повышение надежности эксплуатации сети;
- мониторинг качества электроэнергии и исследование характеристик нагрузки потребителя;

для IT-специалистов:

- оптимизация информационных потоков технологической информации;
- решение вопросов организации телекоммуникационных каналов с учетом специфики передачи высокодискретизированной информации СМПР;

для ответственных за техническое состояние оборудования:

**Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем
Екатеринбург, 3 – 7 июня 2013 г.**

- решение задач диагностики состояния оборудования (контроль витковых замыканий в обмотках генератора);
- определение параметров схемы замещения линий электропередач, трансформаторов, генераторов в реальном времени и так далее.

Очевидно, что каждое приложение специфично и предъявляет свои требования к составу, точности, дискретизации, допустимым задержкам входной информации и т.д. Поэтому актуально рассмотрение вопроса о разработке требований к составу информации для каждого приложения (см. табл. 2), формализация требований к аппаратной части регистраторов, концентраторов векторных данных, архитектуре построения системы, требований к развертыванию комплексов на энергообъектах, коммуникационным протоколам обмена данными СМІР и т.д. Перечисленные вопросы будут исследованы в ходе разработки Стандарта ОАО «СО ЕЭС» «Требования к системе векторной регистрации».

№ п.п.	ЗАДАЧИ	класс (М / Р)	цикличность сбора данных	необходимые параметры ЭР	критерий сбора данных
режим OFF-LINE – приложения с применением архивных данных					
1.	Пост-аварийный анализ	М, Р	50 Гц	f, U ₁ , I, P, Q, δ	при небалансах от 500 МВт
2.	Исследование динамических характеристик ЕЭС	Р	50 Гц	f, U, I, P, Q, δ	
3.	Верификация расчетных моделей	М, Р	10..50 Гц	f, U, I, P, Q, δ	
4.	Визуализация динамики изменения ПЭР	Р	50 Гц	U ₁ , f, U, I, P, Q, δ	непрерывный
5.	Определение параметров схем замещения линий	М	1 Гц	f, U, I, P, Q, δ	периодически
режим ON-LINE – приложения, функционирующие в режиме реального времени					
6.	Мониторинг устойчивости по напряжению	М, Р	1..10 Гц	f, U ₁ , I, P, Q, δ	непрерывный
7.	Расчет максимально-допустимых перетоков	М	10..50 Гц	U ₁ , U, P, Q, δ	непрерывный
8.	Мониторинг перетоков в контролируемых сечениях	М	10..50 Гц	U ₁ , U, P, Q, δ	непрерывный
9.	Управление по углу (напряжению, реактивной мощности)	М, Р	1..50 Гц	U ₁ , U, I, P, Q, δ, δ _{ген}	непрерывный
10.	Мониторинг НЧК, параметров колебаний	М, Р	50 Гц..100 Гц	f, U, P, Q, δ	непрерывный
11.	Оценивание состояния	М	1..10 Гц	f, U, P, δ	непрерывный
12.	Контроль корректности работы АРВ и СВ	М	1..50 Гц	U ₁ , f, U, I, P, Q, δ, I _{возб.} , U _{возб.}	непрерывный
13.	Контроль корректности регулирования частоты	М	1..10 Гц	f	непрерывный
14.	Восстановление энергосистемы (islanding)	М	1..50 Гц	U ₁ , f, U, P, δ	непрерывный
15.	Задачи управления (экспорт данных в ЦСПА, АРЧМ)	М, Р	1..50 Гц	f, U, I, P, Q, δ	непрерывный
16.	Обмен данными с EMS-приложениями	М	1..10 Гц	f, U, I, P, Q, δ	непрерывный
17.	Системы ПА	Р	1..50..400 Гц	в зависимости от алгоритма	непрерывный

Табл. 2: Требования к входной информации для различных задач

Во введенном в 2011 году международном Стандарте С37.118.1 предъявляются требования к характеристикам PMU в части точности фиксации параметров электроэнергетического режима в стационарных и переходных режимах. Стандартом введено два класса: PMU класса «М» (measurement) должны производить высокоточные измерения в стационарном режиме, а измерители класса «Р» (protection) предназначены для быстрых измерений в переходных режимах. В то же время следует учитывать, что Стандарт не специфицирует требования к алгоритмам вычислений, временному окну и т.п. и, очевидно, что в стационарном и переходном режимах погрешности измерений различных PMU, и даже PMU одного типа с различными настройками, могут значительно отличаться. В идеале PMU должно быть отстроено от помех в виде свободных

составляющих токов и напряжений в электромагнитных переходных процессах и высших гармоник, обеспечивать требуемую точность измерения векторов тока и напряжения при изменении частоты в энергосистеме, а также при изменении огибающих токов и напряжений основной гармоники в условиях переходных процессов [10].

В настоящее время в функционирующей в ЕЭС Системе мониторинга переходных режимов (СМПР ЕЭС) применяются РМУ 4-х производителей:

- МИП-01, МИП-02 (ЗАО «РТСофт»);
- ЦРАП ПАРМА РП-11 (ООО «Парма»);
- РЭС-3 СМПР (ОАО «Прософт-Системы»);
- Power Sentinel модели 1133A (Arbiter Systems, USA).

Также разработаны и испытаны преобразователь ЭНИП-3 СМПР (ЗАО «Инженерный центр «Энергосервис») [10] и РМУ ЗАО ИТЦ «Континуум+».

В связи с вышеизложенным еще одной актуальной задачей является проверка характеристик РМУ на соответствие требованиям указанного Стандарта и требованиям к точности измерений в разрабатываемых приложениях. По заказу ОАО «СО ЕЭС» подобные тестовые испытания должны быть проведены в текущем году на программно-аппаратном комплексе RTDS – цифровом симуляторе энергосистемы, работающем в режиме жесткого реального времени. Преимуществом проведения испытаний именно на модели RTDS является возможность повторения тестов с одинаковыми параметрами исходной модели и тестовых сигналов неограниченное количество раз.

В ОАО «СО ЕЭС» ведутся исследования по разработке ПО объемного представления динамики изменения параметров электрического режима в масштабах ЕЭС России по данным СМПР (рис. 2, 3). Синхронизированность измерений обеспечивает возможность мониторинга географически распределенных процессов производства, потребления и передачи электроэнергии. Энергосистема, по сути, является единым объектом, и технология обеспечивает возможность наблюдения за поведением энергосистемы как за единым целым, элементы которого связаны между собой. Идея мониторинга режимных параметров в масштабах всего энергообъединения, то есть идея глобального мониторинга, уже реализована в энергосистемах США, Китая, Испании и др. Технология, образно говоря, выполняет множество последовательных мгновенных снимков состояния энергосистемы, визуализируя динамику изменения режимных параметров и предоставляет оператору четкую картину происходящего в энергосистеме.

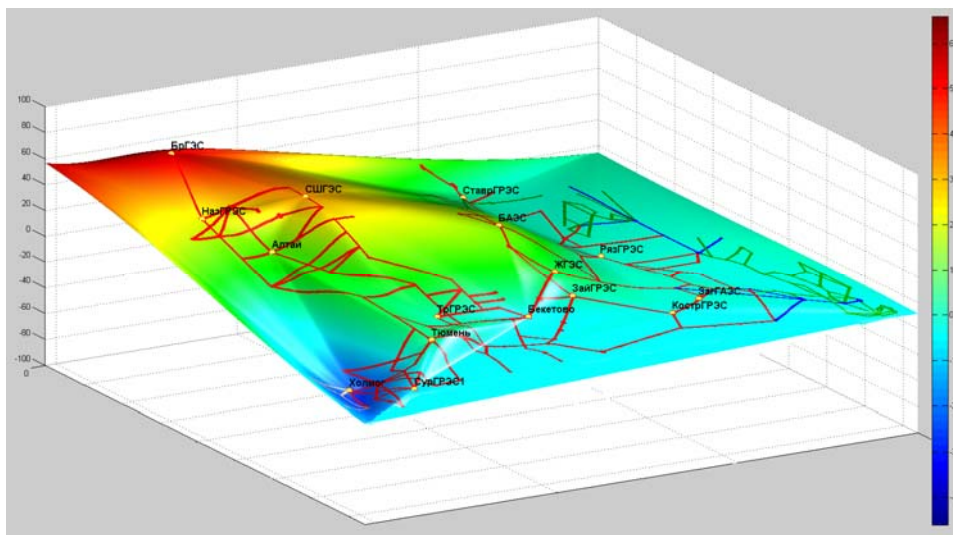


Рис. 2. Распределение относительных углов напряжения по ЕЭС

Визуализация динамики изменения режимных параметров применяется при решении следующих задач:

- повторение события в псевдореальном времени (послеаварийный анализ);
- идентификация технологического возмущения и идентификация места возмущения;
- мониторинг разделения энергосистемы на части.

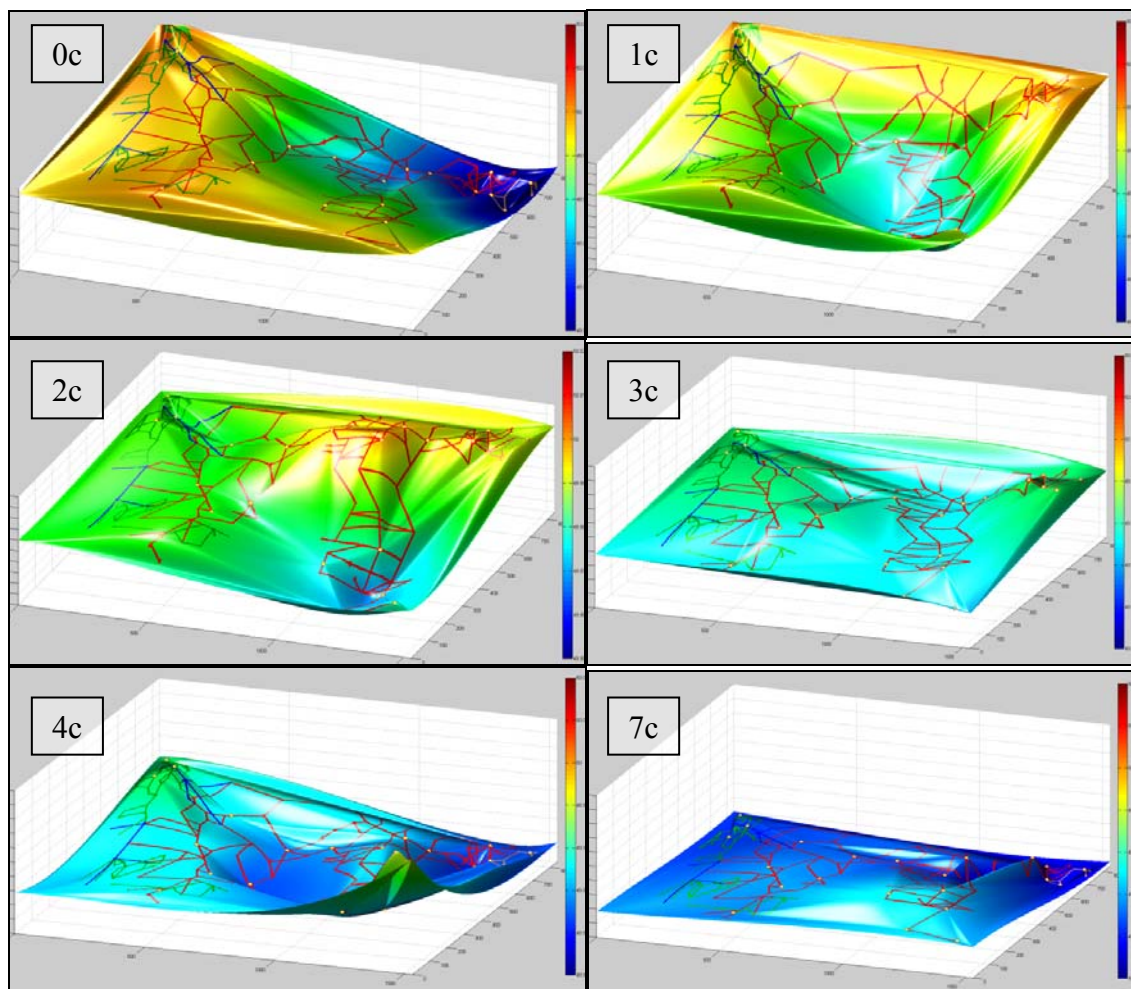


Рис. 3. Процесс распространения волны частоты по ЕЭС при отключении энергоблока Нижневартовской ГРЭС (небаланс 795 МВт)

При развитии технологии, безусловно, есть объективные технические сложности. В основном это предъявление повышенных требований к коммуникационной инфраструктуре и аппаратной части программно-аппаратных комплексов, а также необходимость адаптации функционирующих приложений с целью применения в их алгоритмах «качественно новых» данных. И если вопросы по первой части проблемы практически компенсируются бурным развитием IT-технологий, значительным удешевлением затрат на передачу информации, то необходимость создания и модификации алгоритмов и программного обеспечения в целях корректного применения синхронизированной и высокодискретизированной информации зачастую требует существенных затрат, как в части разработки методик и алгоритмов, так и при интеграции в существующую структуру оперативно-диспетчерского управления.

В качестве дальнейшего развития применения данных векторной регистрации в практических задачах режимного и противоаварийного управления в ЕЭС России планируется продолжать исследования в следующих направлениях:

- отслеживание межсистемных качаний мощности;
- создание пусковых органов ПА нового типа с применением данных СМНР;
- создание ПА для выявления и недопущения угрозы возникновения каскадных аварий;
- создание координирующей системы ПА более высокого уровня;
- разработка новых методов определения пределов устойчивости энергосистемы, путем измерения демпфирующих свойств энергосистемы в режиме реального времени;
- управление режимом работы электропередачи по текущим опасным сечениям с применением АОП АРЧМ;
- обеспечение защиты целостности энергосистемы, отслеживание нарастания колебаний, осуществление необходимого противоаварийного воздействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В энергообъединении ЕЭС/ОЭС успешно развивается Система мониторинга переходных режимов, реализующая технологию векторной регистрации параметров режима энергообъединения.
2. Первоочередная задача – реализация потенциала технологии для улучшению надежности и качества управления энергосистемой.
3. Влияние технологии векторных измерений на развитие электроэнергетики в России, как и во всем мире, постоянно возрастает. Для эффективного развития и применения технологии необходимо развитие удовлетворяющей требованиям технологии коммуникационной инфраструктуры (низкие задержки передачи данных, обеспечение кибербезопасности, быстрая обработка информации и т.д.).
4. Ведутся работы по внедрению технологии векторных измерений параметров электрического режима в целях совершенствования систем оперативно-диспетчерского и автоматического управления ЕЭС России.
5. С созданием СМПР возникли предпосылки создания принципиально новых систем автоматического регулирования и управления режимами энергообъединения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Аюев Б.И. О системе мониторинга переходных режимов / Энергорынок, №2, 2006.
- [2] Н. Шульгинов, Л. Кощеев, А. Жуков, А. Демчук Повышение эксплуатационной надежности ЕЭС России средствами противоаварийного автоматического управления – Материалы 43-ей сессии СИГРЭ, 2010г.
- [3] А.В. Жуков, А.Т. Демчук, Д.М. Дубинин. Развитие технологий векторной регистрации параметров для противоаварийного и режимного управления электрическими режимами энергосистем / РЗА 2012 // Тез. докл. XXI междунар. науч.-техн. конф. М., ВВЦ, 2012. С. 232-245.
- [4] Куликов Ю. А. Использование технологии векторного измерения параметров в ЕЭС России для информационного обеспечения оперативно-диспетчерского управления / «Энергетик», №1, 2009.
- [5] Демчук А.Т., Жуков А.В., Кац П.Я., Данилин В.А. Система мониторинга запасов устойчивости энергосистемы с использованием технологии векторного измерения параметров / Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем. Сб. тр. Международной научно-технической конференции, Москва, 2009.
- [6] Герасимов А.С., Есипович А.Х., Жуков А.В., Демчук А.Т., Негреев А.П. Система мониторинга автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов электростанций ЕЭС России / РЗА 2012 // Тез. докл. XXI междунар. науч.-техн. конф. М., ВВЦ, 2012. С. 457-463.
- [7] Аюев Б.И., Герасимов А.С., Есипович А.Х., Куликов Ю.А. Верификация цифровых моделей ЕЭС/ОЭС. Электричество, №5, 2008.
- [8] Герасимов А.С., Есипович А.Х., Куликов Ю.А., Смирнов А.Н. Опыт верификации динамической модели ЕЭС/ОЭС по данным системы мониторинга переходных режимов. / Сборник научных трудов «Известия НИИ постоянного тока». СПб, 2009.
- [9] Жуков А.В., Куликов Ю.А., Герасимов А.С., Есипович А.Х. Программа динамических испытаний цифровых регистраторов системы мониторинга в тестовой схеме физической модели энергосистемы / Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем - 2011 // Сб. мат. межд. науч.-техн. конф.СПб, 2011.
- [10] Мокеев А.В. Алгоритмы обработки сигналов ИЭУ на основе технологии векторных измерений / Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем // Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. М., 2011.