



PS5 – S2-05



Измерения параметров синхронных векторных величин – опыт немецких специалистов

М. ВАШЕ¹, Х. КУХН², К.О. ХАЙДЕ¹, Р. КРЕБС¹
Siemens AG¹, Transpower²
Германия
chris.heyde@siemens.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Устройство измерения параметров векторов (PMU), вектор, синхронные векторные величины, мониторинг сетей крупных регионов, концентратор векторных данных, процессор векторных данных, перегрузка, устойчивость.

АННОТАЦИЯ

Устойчивость электрических передающих сетей в последние годы привлекает к себе все больше внимания во всем мире. Последовавшие друг за другом несколько отключений целых энергосистем, так называемых блэкаутов, например, в Европе и Северной Америке, показали, что передающие сети должны быть усовершенствованы как в отношении пропускной способности, так и устойчивости.

Быстрое строительство новых линий обычно не рассматривается выходом из ситуации, поэтому меры по увеличению устойчивости существующих сетей представляют большой интерес. Одним из хорошо зарекомендовавших себя методов увеличения наблюдаемости энергосистемы является использование данных измерения параметров векторных величин в распределенных точках сетей энергосистем. Обработанная соответствующим программным обеспечением, информация, поступающая с устройств измерения векторных величин (PMU), дает возможность инженерам АСУ ТП понимать степень стабильности во всей сети. Это помогает им в принятии правильных решений даже в критических ситуациях. В данной статье обсуждается применение такой Системы обработки векторных данных в немецкой национальной распределительной сети (German Transmission System).

1 ВВЕДЕНИЕ

Использование синхронных векторных величин для контроля и повышения стабильности сетей передачи энергии получает все большее значение во всем мире. Цель состоит в том, чтобы контролировать состояние системы, увеличить степень информированности о стабильности системы и сделать оптимальным использование существующих линий. Таким образом, может быть повышена стабильность всей системы, и даже улучшены рабочие характеристики передачи энергии.

2 УСТОЙЧИВОСТЬ СЕТИ И ИЗМЕРЕННЫЕ СИНХРОННЫЕ ВЕКТОРНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

2.1 Влияние на стабильность сети

На стабильность сети могут влиять многие события (см. рисунок 1). В Европейской скоординированной сети (ранее - сеть UCTE) в первую очередь играет роль растущее

количество энергии, поступающей от ветряных генераторов. Изменение в зависимости от ветра и нагрузки характеристик производительности передачи энергии между севером и югом делает процесс управления энергосистемой ответственной задачей. А еще причинами качаний мощности могут служить:

- Отключение линий защитой при повреждениях,
- Нехватка реактивной мощности,
- Сильные колебания нагрузки,
- Слабо затухающие качания, особенно в широких областях.

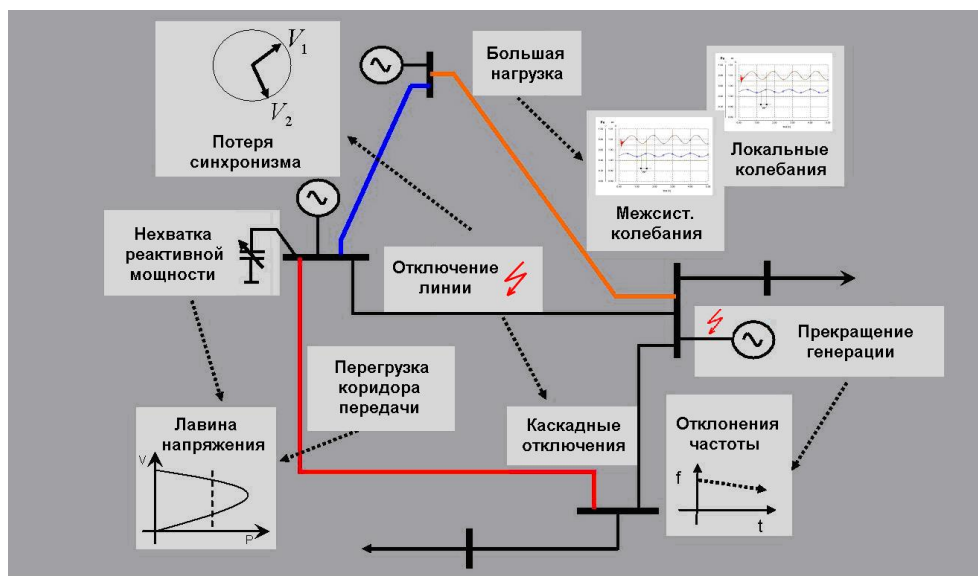


Рис. 1: Причины нестабильности в сетях передачи электроэнергии

Чтобы поддерживать стабильность сети на максимально возможном уровне, могут быть использованы синхронные векторные величины. Эти мгновенные значения в реальном масштабе времени позволяют лучше выполнить оценку состояния энергосистемы, что помогает операторам АСУ ТП принять решения о необходимости их вмешательства.

2.2 Устройство измерения векторных величин

Синхронные векторные величины фиксируются так называемыми Устройствами измерения векторных величин (PMU). Это на сегодняшний день наиболее современные устройства. В передающих сетях используются определенные PMU; в распределительных сетях эта функция может быть интегрирована в другие устройства, например, в реле защиты. В течение долгого времени измерение и обработка векторных величин использовались, например, в устройствах дистанционной защиты для принятия решения о пуске защиты и выдаче команды отключения. Нововведения состоят в том, что, с одной стороны, векторным величинам присваиваются метки времени с использованием Глобальной системы позиционирования GPS, а с другой стороны, что синхронные векторные величины собираются из широко распределенной передающей сети в центральной точке с целью их надлежащей оценки и использования как инструмента контроля. Устройства PMU отсылают измеренные векторные величины на базе стандартизированного IEEE-протокола C37.118.

Использование синхронных векторных величин обсуждалось на многочисленных конференциях; см. [1] - [6]. Следующие области являются потенциальными областями их применения:

- Проверка моделей сети: Сравнение данных моделирования с измеренными PMU значениями [5].
- Идентификация субсинхронных качаний с анализом соответствующего демпфирования.
- Комбинация «медленных» измеренных RTU значений с измеренными синхронными векторными величинами в АСУ ТП сети с целью идентифицировать и проанализировать переходные процессы в энергосистеме.

- Усовершенствование процесса оценки сети в АСУ ТП.
- Использование полной передающей способности линий.
- Оценка показателя стабильности напряжения.

Хотя в обсуждениях специалисты склоняются к использованию метода в передающих сетях, растет интерес к нему и среди специалистов по распределительным сетям.

На рис. 2 показано распределение устройств PMU в качестве приборов измерения мгновенных значений в реальном масштабе времени с централизованной оценкой для больших областей сети. В этом варианте они расположены между устройствами защиты (мгновенные измеренные значения, но возможна только локальная оценка) и АСУ ТП сети (контроль больших областей сети, но с медленными измеренными величинами).

Чтобы синхронные векторные величины фактически могли сравниваться друг с другом, их измерение должно производиться с присвоением очень точной метки времени. Только в этом случае центральная система контроля (Концентратор векторных данных (PDC)) может отображать корректные векторные величины вместе, таким образом давая возможность оценить динамическое состояние сети. При частоте сети, равной 50 Гц, погрешность метки времени в 1 миллисекунду уже приведет к погрешности угла фазы в 18 градусов. Точность PMU выражается при помощи показателя Полной векторной погрешности (TVE) – комбинации отклонения точности измерения устройства PMU и точности его синхронизации времени. Чтобы соответствовать стандартному протоколу IEEE C37.118, PMU должен показать TVE = 1 % или лучше.

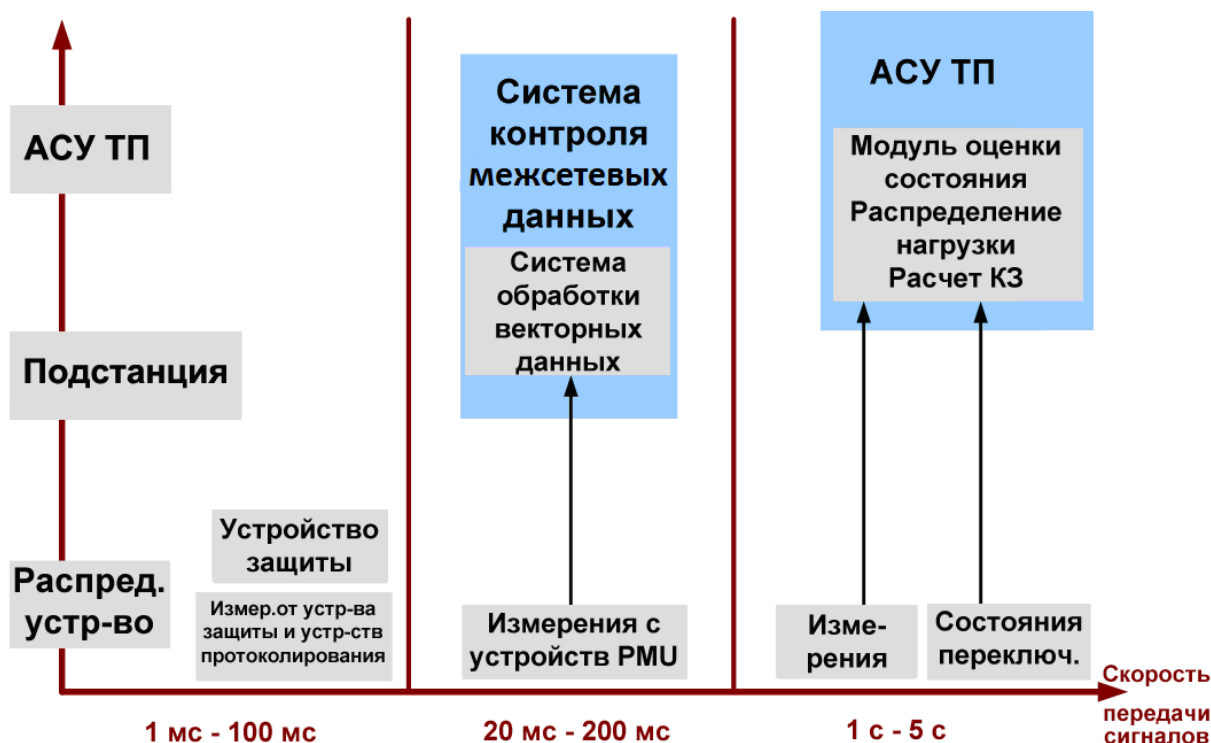


Рис. 2: Система контроля большой области сети в сравнении с контролем и защитой энергосистемы

Скорость передачи данных измеренных PMU величин высокой точности в сетях с частотой 50 Гц составляет обычно 10 Гц или 50 Гц. Поэтому можно контролировать не только медленные, квазиустановившиеся явления, но также и быстрые переходные качания мощности. Контролируемая область может представлять собой единичный коридор передачи с одной или более линиями, или же передающую сеть с широкой областью охвата, такую, как система USTE. В экспериментальном проекте передачи энергии, описанном здесь, контролируется вся передающая сеть 400 кВ. Ее область охвата простирается от Северного моря до Альп, через всю Германию.

2.3 Система обработки векторных данных

Данная статья представляет Систему обработки векторных данных SIGUARD®-PDP. Эта система является программным пакетом контроля, который помогает оператору сети в получении информации о состоянии и стабильности энергосистемы. Система SIGUARD®-PDP, представленная на рис. 3, устанавливается в центральной точке и соединяется с устройствами измерения векторных величин PMU через быстродействующую линию обмена данными (например, 2 Мбит/с).

Являясь центральным компонентом системы, Концентратор векторных данных получает через каналы обмена данными оперативные измеренные величины подключенных устройств PMU. Это векторные величины тока и напряжения, а также частоты, изменения частоты и т.д. Такие измеренные величины постоянно заносятся в архив и передаются на графический пользовательский интерфейс (ЧМИ – интерфейс «человек-машина»). В Системе обработки векторных данных реализован контроль линий обмена данными, качества данных от PMU и внутренних функций системы. Через ЧМИ пользователь может выбрать между непосредственным наблюдением данных в режиме онлайн и анализом архивных данных в режиме оффлайн. По желанию можно переходить из одного режима в другой, быстро и просто «бросая взгляд назад в прошлое».

Далее рассмотрим более подробно ЧМИ пакета SIGUARD®-PDP и описание самого пакета. Интерфейс «человек-машина» должен поддерживать оператора сети в процессе идентификации и анализа критических состояний сети и предоставлять помощь в исследовании их причин. Данный интерфейс должен быть несложным и должен позволять выполнять операции интуитивно. Он должен предоставлять возможность выполнения следующих задач:

- Общее отображение состояния сети (исправное / критическое).
- Свободный выбор измеряемых величин, которые будут контролироваться во время работы, с возможностью выбора между векторной или временной диаграммой.
- Установка предельных значений для их контроля.
- Простота перехода из режима онлайн в режим оффлайн и обратно для быстрого анализа критических ситуаций.
- Географическое представление энергосистемы с точками подключения устройств измерения векторных величин PMU для быстрого выявления областей сети с проблемами стабильности.
- Экспорт данных для дальнейшего анализа с помощью независимых инструментов и для составления отчетов.

На приведенных ниже рисунках показана реализация этих требований в Системе обработки векторных данных SIGUARD®-PDP. Все скриншоты – это примеры с моделируемым данными процессов.

На рис. 4 показана структура главного окна SIGUARD в четырех частях:

- **Состояние энергосистемы:** Данная диаграмма показывает совокупный показатель полного состояния контролируемой сети. Все измеренные устройствами PMU значения подвергаются вычислениям с целью проконтролировать предельные величины. Чем ближе кривая подходит к пунктирной линии предельной величины, тем более критическим считается состояние сети. Когда, по крайней мере, одна измеряемая величина нарушает предел, цвет кривой состояния энергосистемы изменяется с черного на красный, что позволяет быстро и легко это распознать такую ситуацию.
- **Географическое представление:** Это окно отображает географическое расположение контролируемой передающей сети с линиями и подстанциями. Благодаря цветовой кодировке элементов сети оператор может немедленно распознать область, где имеются проблемы, например, с перегрузкой в случае выбора цветового кодирования по току / мощности. Если выбирается цветовая кодировка по углам напряжения, то может контролироваться стабильность установившегося режима.

В приведенном примере цвет квадратов, представляющих подстанции, указывает состояние напряжения (синий = исправное, желтый = нарушено предельное значение 1, красный = нарушено предельное значение 2). Таким же образом цвет линий электропередачи указывает соответствие предельным величинам для тока. Если обмен данными с PMU будет нарушен, цвет элементов сети изменится на серый, что указывает

на недействительность измеренных величин.

- **Область отображения измеренных величин:** Эта центральная область отображает временную характеристику выбранных векторных величин или других измеренных или расчетных величин. Выбор может осуществляться неоднократно при продолжающейся работе и гибко приспосабливаться к эксплуатационным требованиям. Выбор осуществляется из списка всех измеряемых величин в области конфигурации.
- **Область конфигурации:** Здесь перечисляются все доступные измеряемые величины подключенных устройств PMU. Различные критерии просмотра (по имени, типу или устройству) позволяют быстро осуществлять просмотр. Имеется два типа измеряемых величин: векторные (могут также быть выведены в виде временной характеристики, например, ток, напряжение) и аналоговые (могут быть выведены только в виде временной характеристики, например, частота, активная мощность). Если необходимо, могут быть рассчитаны и выведены так называемая «кривая «мощность-напряжение» или «пиковая кривая».

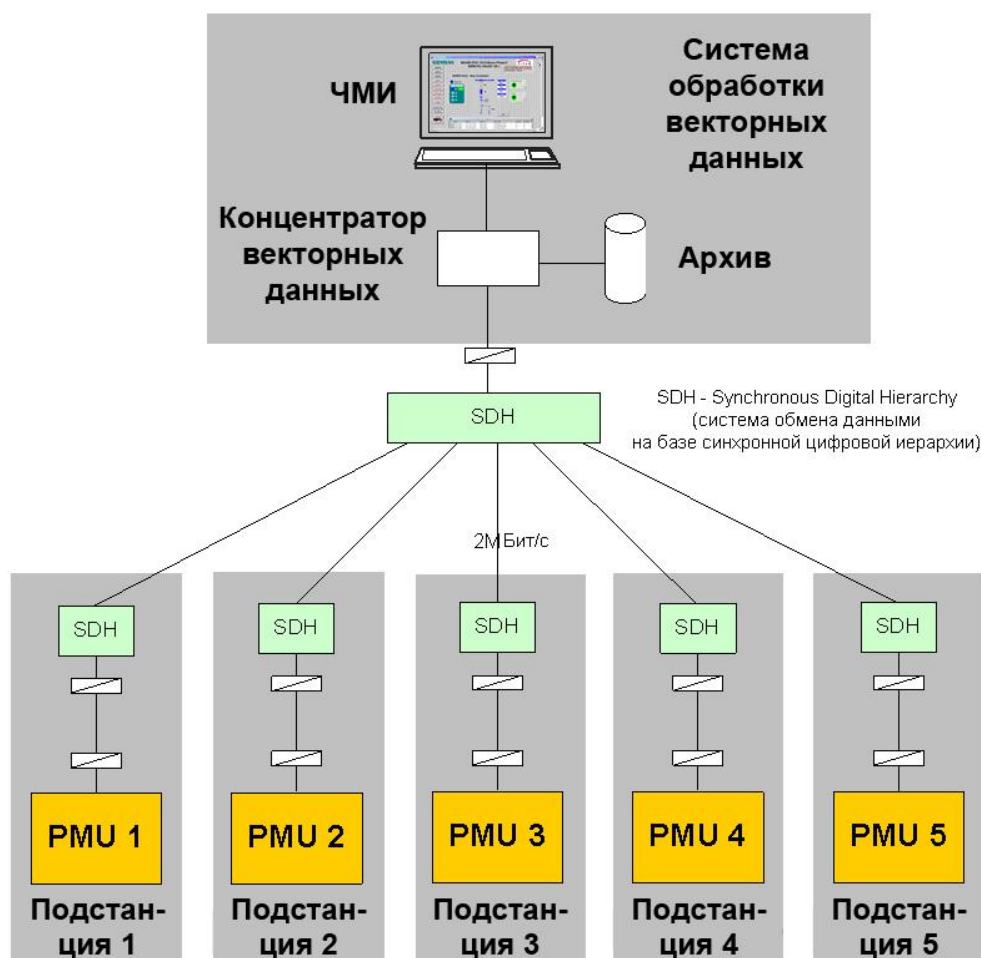


Рис. 3: Конфигурация Системы обработки векторных данных с 5 подключенными устройствами PMU

Легкий переход из режима онлайн в режим оффлайн и обратно осуществляется с помощью кнопки выбора (вверху справа). Пользователь легко может перемещаться между режимом контроля онлайн и режимом оценки архивных данных.

На рис. 5 и 6 показаны различные типичные приложения для представления в поле измеренных величин: векторные на рис. 5 и «пиковая кривая» на рис. 6.

На векторной диаграмме угол фазы и амплитуда выбранных токов и напряжений можно сравнивать друг с другом непосредственно. Если векторные данные устройств PMU, которые расположены далеко друг от друга по всей сети, объединить в одном представлении, становится возможным проникнуть в суть состояния нагрузок сети, баланса реактивной

мощности и стабильности.

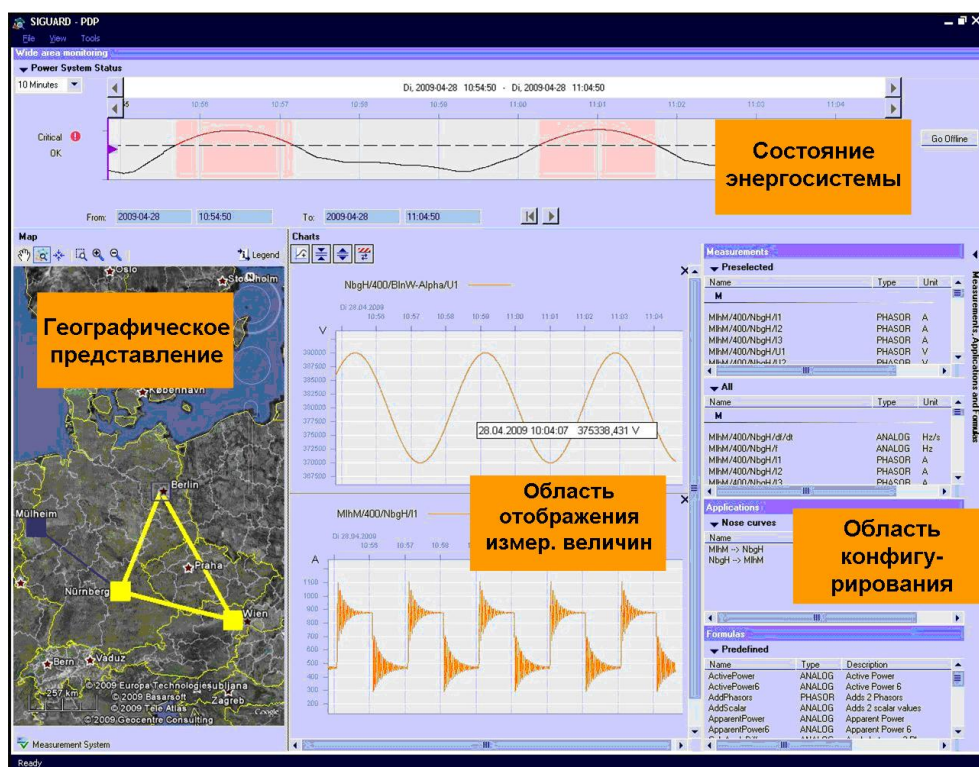


Рис. 4: Структура ЧМИ SIGUARD®-PSA

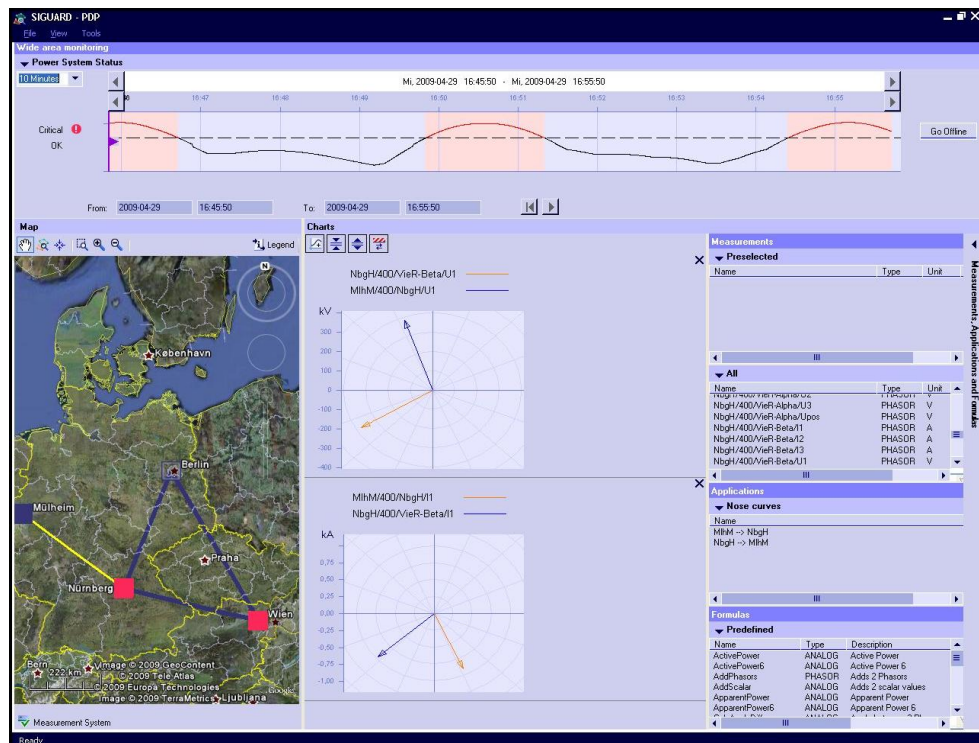


Рис. 5: Пример визуализации в области измеряемых величин

«Пиковая кривая» является представлением напряжения по активной мощности для одной линии передачи. Для вычисления и отображения необходимо наличие PMU в обоих концах линии. При выполнении измерений на обоих концах линии пиковая кривая может

динамически обновляться, то есть изменения параметрах линии в результате колебаний температуры или нагрузки будут автоматически распознаваться. Таким образом, сравнивая фактическую точку функционирования (фактическое напряжение против фактической активной мощности) с точкой неустойчивости, становится возможным точно измерить, какое количество дополнительной мощности может присутствовать на линии без потери устойчивого состояния стабильности.

С помощью Редактора предельных величин может быть определено до шести пределов для каждой измеряемой величины. Процессор векторных данных контролирует все выбранные измеренные величины относительно соблюдения пределов.

При работе в режиме оффлайн могут быть проанализированы все архивные данные. Оператор может выбрать диапазон на оси времени кривой Состояния энергосистемы и затем воспроизвести события в этом диапазоне времени, чтобы проанализировать критические ситуации, так часто как ему это нужно. Выбор измеряемых величин в «области измеряемой величины» может также быть изменен с целью найти причины возмущений в сети. В таком режиме «воспроизведения» цвета символов системы в Географическом представлении обновляются в соответствии с воспроизводимыми характеристиками измеряемой величины.

При работе в режиме оффлайн все зарегистрированные данные архива за выбранный промежуток времени могут быть экспортированы в формате файла *.CSV. Это позволяет выполнять оценку и документирование с помощью других инструментов, например, выполнять табличное вычисление для того, чтобы быстро и легко составить отчеты.

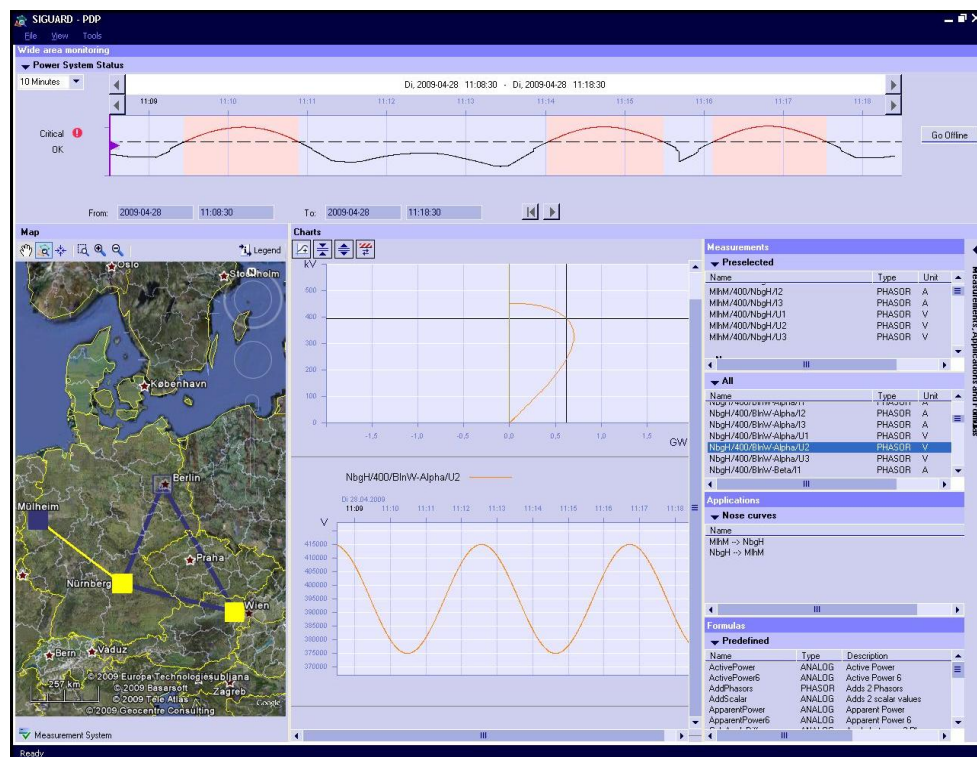


Рис. 6: Пример «пиковой кривой»

3 ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Система контроля большой области сети SIGUARD®-PDP использовалась в компании по транспортировке электроэнергии Stromübertragungs-GmbH (бывшая E.on Netz), один из четырех немецких системных операторов, в течение приблизительно полугода. В это время никаких возмущений в сети не происходило, состояние функционирования всегда было абсолютно лишено критических ситуаций. Возникла необходимость анализа небольшого количества нештатных ситуаций, таких как, как отключение АЭС в Крюммеле 4 июля 2009, когда векторные данные послужили чрезвычайно хорошей основой. Исследования были сильно

упрощены с помощью данных от устройств PMU.

В будущем планируется расширить работу с данными PMU и их анализом и использовать Систему контроля большой области сети SIGUARD®-PDP дополнительно для обучения операторов в условиях динамического изменения параметров энергосистемы.

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Являясь инструментом централизованной оценки динамики и стабильности сети, система контроля векторных данных вызывает интерес во всем мире. Тендеры по таким системам были проведены во множестве стран. Прогрессивное развитие рассматривается в следующих терминах:

- Интерфейсы с системами АСУ ТП (общий архив, экспорт измеренных величин, список аварийных сообщений).
- Интерфейс с другими операторами энергосистем для обмена измеренными устройствами PMU величинами.
- Объединение управляемых элементов сети (регулировка угла фазы, Статический Вар-компенсатор, передача по линиям электропередачи высокого напряжения на постоянном токе (HVDC)) в качестве предварительной стадии автоматизированного управления энергосистемой.

Для взаимосвязанных сетей, например, Европейской сети UCTE, передача синхронных векторных величин между Операторами передающих систем имеет смысл. Благодаря знанию измеренных величин PMU с критических точек во всей сети, которые могут быть показаны в таких программах отображения, как SIGUARD®-PDP на «всеевропейском мониторе» для каждого системного оператора, обзор сети может быть еще более улучшен. Если бы такая система была доступна 4 ноября 2006, когда произошло большое возмущение в системе UCTE, системный оператор смог бы очень быстро определить, что сеть UCTE распалась на зоны различной частоты.

На основании использования устройств PMU становится возможным контроль коридоров передачи между различными системными операторами.

Необходимые каналы обмена данными для передачи синхронных векторных величин уже существуют широко в виде так называемого «электронного шоссе» между системами АСУ ТП. При использовании, например, 50 распределенных по всей Европе устройств PMU, может быть реализован превосходный обзор состояния сети UCTE. Сделать это реальностью было бы относительно несложно, независимо от других интерфейсов центра систем АСУ ТП.

Практический опыт выполнения экспериментальных проектов помогает производителям продолжать разработку их продуктов в верном направлении.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] P. Gomes, G. Krost and R. Pestana, 'System Operation and Control' CIGRE Session 2008, Special Report for Group C2.
- [2] T. Sezi, J. Warichet, B. Genet and J.-C. Maun, 'Bringing New Visualization Tools for the Detection and Mitigation of Dynamic Phenomena in the Transmission System' CIGRE Session 2008 Paper C2-112.
- [3] A. G. Phadke and J. S. Thorp, 'Synchronized Phasor Measurements and their Applications' Springer Verlag 2008.
- [4] C. Rehtanz, K. v. Sengbusch, T. Sezi and R. Simon, 'Schutz- und Überwachungskonzepte auf Basis zeitsynchroner Messungen' ETG/BDEW-Tutorial 'Schutz- und Leittechnik', Fulda, 11.-12. Nov. 2008.
- [5] B. Ayuev, P. Erokhine and Y. Kulikov, 'PMU Application for IPS/UPS Dynamic Performance Monitoring and Study' CIGRE Session 2008 Paper C2-101.
- [6] Z. Styczynski, Prof. Sauvain, B. Buchholz and M. Wache, 'PMU and Wide Area Measurements in Distribution Systems' CIRED 2009, 20th International Conference on Electricity Distribution Prague 8-11 June 2009, Round Table 3b.

