

DOI:

СИНХРОНИЗИРОВАННЫЕ ВЕКТОРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ

Жматов Д.В.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,

Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65

absh-sila@rambler.ru

Аннотация: Рассмотрен метод симметричных составляющих по прямой, обратной и нулевой последовательности, который широко используется для определения токов короткого замыкания. Представлены методы и алгоритмы по определению синхронизированных векторных измерений и их применение на цифровых подстанциях.

Ключевые слова: цифровая подстанция, векторные измерения, интеллектуальная энергетика

Введение

В настоящее время диспетчер на подстанции отвечает за многие функции при управлении подстанцией, такие как: планирование генерации электроэнергии, производимой синхронными двигателями; контроль переходных процессов; контроль плановых отключений и аварийное восстановление системы.

К тому же, зачастую в работе оператора на подстанции возникают незапланированные и плохо формализуемые события.

В то же время, в мире наблюдается все более широкое внедрение цифровых подстанций, характерными особенностями функционирования которых являются:

- унификация исполнительных устройств посредством увеличения количества функций каждого устройства;
- применение синхронизированных векторных измерений для диагностики состояния полевых устройств цифровой подстанции;
- управление качеством электроэнергии.

1 Методология работы цифровой подстанции

Представлена разработанная авторами геометрическая модель пространственных сигналов для каждого момента времени. Характеристика (отклонение от заданных параметров при наличии нелинейных искажений) определяется только формой. В качестве эталона можно взять любую форму (вид) геометрической фигуры. В свою очередь, выбор формы фигуры будет зависеть от количества входных данных при решении задач мониторинга и преобразования физических величин.

Информационно-управляющая система позволяет, как фиксировать отклонения от заданных параметров, так и рекомендовать методы для их компенсации.

Главным направлением развития современных систем электроснабжения является интеллектуальное управление, на базе которого планируется развитие цифровых подстанций, оно заключается в возможности изменения состояния системы электроснабжения (СЭС) и значений характеристик оптимального управления. Основой для реализации данного направления является теория интеллектуальных систем электроснабжения (Smart Grid), позволяющих выстроить высоконадежные нагруженные автоматические балансирующие самовосстанавливающиеся электроэнергетические системы, способные получать энергию из различных источников. Используемые системы Smart Grid, включают телекоммуникационные технологии контроля для генерации, передачи, распределения и измерения электрической энергии.

Оператор несет ответственность за многие функции управления цифровой подстанцией в режиме реального времени. Данные функции включают в себя: планирование производства электроэнергии синхронными двигателями, контроль переходных процессов, контроль плановых отключений, регулирование основной частоты сети электроснабжения и аварийное восстановление системы.

Зачастую в работе оператора на подстанции возникают незапланированными плохо формализуемыми событиями, что делает неэффективным использование оценивания состояния электроэнергетической системы. Для построения эффективных алгоритмов оценки и прогноза, прежде всего, необходимо разработать для оператора систему мониторинга состояния электроустановок, которая будет функционировать на подстанции. Оператор сможет интерактивно ввести данные, описывающие текущую ситуацию и управлять потоками распределения электроэнергии,

соответствующий данной ситуации. Применявшиеся до недавнего времени алгоритмы оценки состояния системы электроснабжения использовали измерения линейных потоков, действительную и реактивную мощность, чтобы определить углы и величину напряжения на шине.

2 Протокол МЭК 61850

В настоящее время в области АСУ ТП по управлению системами электроэнергетики лежат в основе формирования аппаратных и программных концепций и средств управления с целью использования в цифровых электроподстанциях. Появились высоковольтные цифровые трансформаторы тока и напряжения; разрабатывается основное и вторичное электросетевое оснащение с интегрированными коммуникационными портами; изготавливаются микропроцессорные контроллеры, оборудованные приборными панелями, в основе которых лежит мировой стандарт МЭК 61850, регулирующий представление сведений о подстанции равно как о предмете автоматизации, а кроме того протоколы цифрового обмена информацией среди микропроцессорными интеллектуальными электрическими приборами подстанции. Сюда входят устройства контроля и управления релейной защиты и автоматики (РЗА), противоаварийной автоматики (ПА), телемеханики, счетчики электроэнергии и т.д. [1]

Целью построения подстанции новейшего поколения – цифровой подстанции (ЦПС), в которой формирование абсолютно всех потоков данных при решении вопросов прогноза, анализа и управления.

В России создана принципиально новая технологическая система - интеллектуальная электрическая сеть с активно-адаптивными элементами в основе цифровой подстанции (рис. 1), которую описать следующими параметрами [2]:

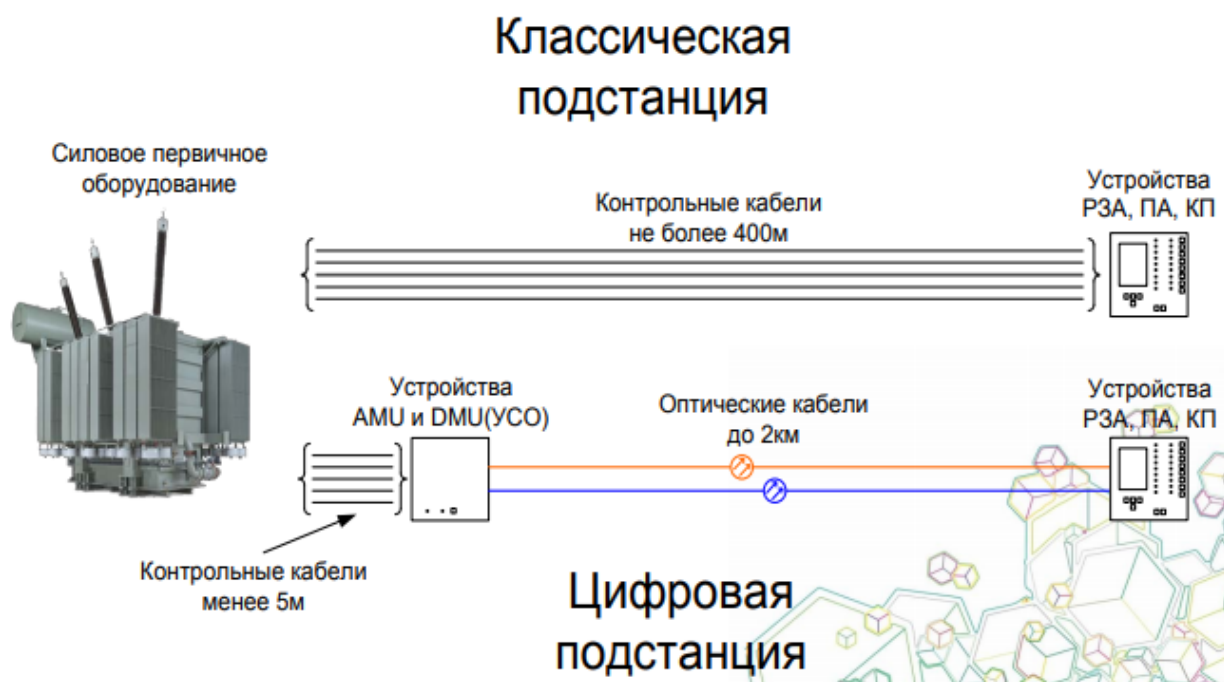


Рис. 1. Сравнительный анализ схемы управления «классической» и «цифровой» подстанцией

- наличием активных элементов, изменяющих параметры сети;
- достаточным количеством датчиков текущих параметров и быстродействующей системой сбора, передачи и обработки информации;
- развитой информационной системой с циклическим контролем состояния ЭЭС;
- средствами адаптивного управления в реальном масштабе времени с воздействием на активные элементы сети, генераторы и потребителей.

Таким образом необходим единый комплекс противоаварийного управления с воздействием на элементы управления системы электроснабжения для предотвращения развития аварий, их локализации и послеаварийного восстановления.

3 Основные положения синхронизированных измерений

Информационное обеспечение задач анализа наблюдаемости режимов. Для решения задач обеспечения наблюдаемости необходимы измерения токов по ветвям цепи и напряжений в ее узловых точках. Эта задача может быть решена при использовании технологий PMU-WAMS (Phasor Measurement Units Wide Area Measurement Systems) [3], которые уже в настоящее время используются в современных ЭЭС (рис. 2). Метод описывается в виде шести векторов тока и напряжения по каждой фазе трехфазной системы электроснабжения. Для каждого присоединения может быть рассчитано около десяти параметров качества электроэнергии по основной гармонике, а с помощью синхровекторов (синхронизированных по времени и частоте векторов тока и напряжения), могут быть рассчитаны и параметры самой энергосистемы в целом. В свою очередь, это способствует управлению штатными и аварийными режимами на цифровых подстанциях в условиях переходных процессов.

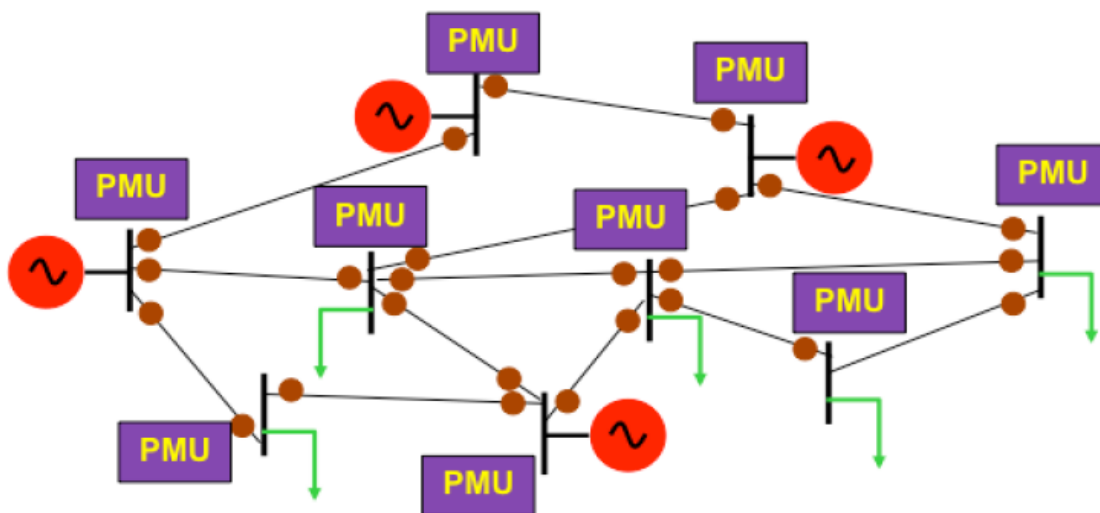


Рис. 2. Система синхронизированных измерений применением PMU WAMS

Концепция WAMS нашла свое применение в мире, важной частью которой является улучшение управлением переходными режимами СЭС, например, при отклонении основной частоты. В дальнейшем эти данные необходимо использовать при параметрической идентификации ЛЭП, турбин, электродвигателей, цифровых трансформаторов.

Таким образом системы переходных процессов являются многофункциональными устройствами, объединяющие цифровые подстанции, соединенные как с силовыми трансформаторами так и трансформаторами собственных нужд. Важной особенностью активно-адаптивных систем является получение информации о системе в целом в реальном режиме времени, без запаздывания благодаря высокоскоростным каналам передачи данных.

Разработанной информационно-измерительной системе используется метод симметричных составляющих фаз напряжений U_A , U_B , U_C для прямой, обратной и нулевой последовательности.

Система прямой последовательности (рис 3) состоит из трех векторов A_1 , B_1 , C_1 , равных по модулю и повернутых относительно друг друга на 120° , причем вектор B_1 отстает от вектора A_1 на 120° . Используя оператор a трехфазной системы, можно записать:

$$(1) \quad \begin{aligned} U_{B1} &= a^2 U_{A1} \\ U_{C1} &= a U_{A1} \end{aligned}$$

Система обратной последовательности (рис 3) состоит из трех векторов A_2 , B_2 , C_2 , равных по модулю и повернутых относительно друг друга на 120° , причем вектор B_2 опережает вектор A_2 на 120° :

$$(2) \quad \begin{aligned} U_{B2} &= a U_{A2} \\ U_{C2} &= a^2 U_{A2} \end{aligned}$$

Система нулевой последовательности (рис 3) образована тремя векторами, совпадающими по фазе:

$$(3) \quad U_{A0} = U_{B0} = U_{C0}$$

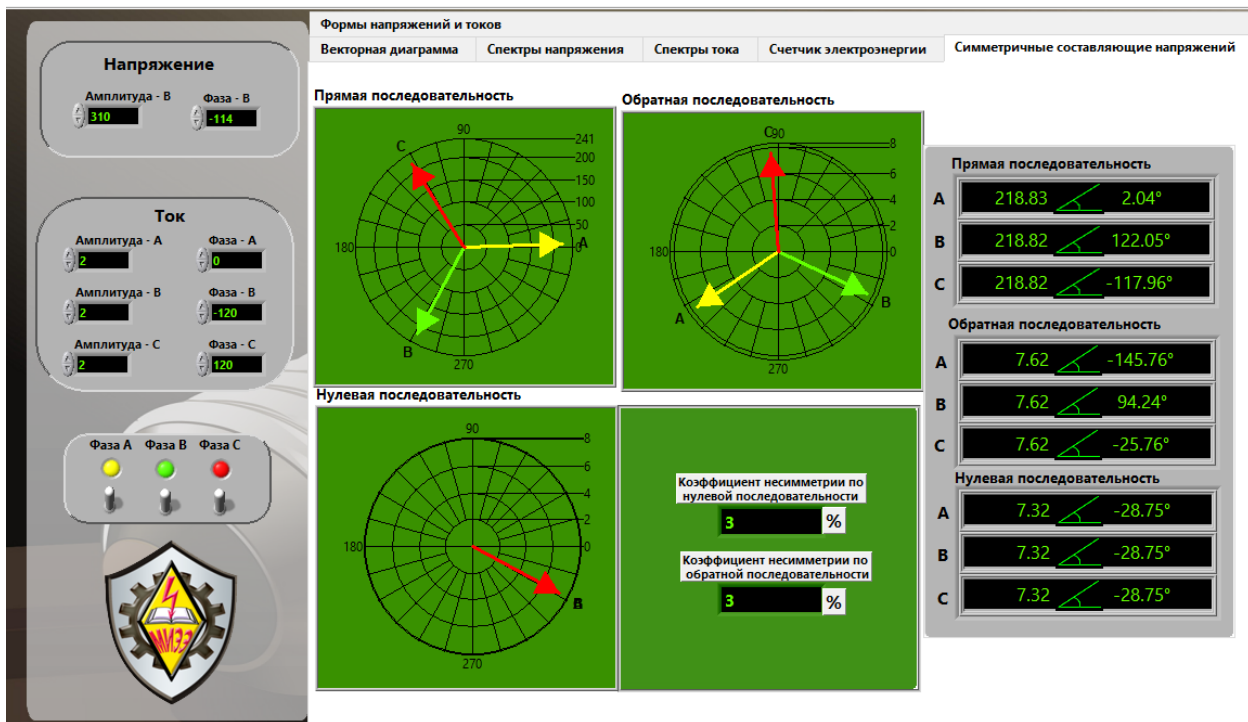


Рис. 3. Графическое отображение метода симметричных составляющих
 Выразим заданные три вектора A, B, C через векторы симметричных систем следующим образом:

$$(4) \quad \begin{aligned} U_A &= U_{A0} + U_{A1} + U_{A2}; \\ U_B &= U_{B0} + U_{B1} + U_{B2}; \\ U_C &= U_{C0} + U_{C1} + U_{C2}. \end{aligned}$$

Перепишем (4) с учетом (1) и (2):

$$(5) \quad U_A = U_{A0} + U_{A1} + U_{A2};$$

$$(6) \quad U_B = U_{A0} + a^2 U_{A1} + a U_{A2};$$

$$(7) \quad U_C = U_{A0} + a U_{A1} + a^2 U_{A2}.$$

Из системы уравнений найдем (5-7) A_0, A_1, A_2 через заданные векторы A, B, C . Для определения A_0 сложим уравнения (5) – (7) и учтем, что $1 + a + a^2 = 0$.

Таким образом, для нахождения A_0 следует геометрически сложить три заданных вектора и одну треть от полученной суммы.

Для нахождения вектора A_1 к уравнению (5) прибавим уравнение (6), умноженное на a , и уравнение (7), умноженное на a^2 .

Следовательно, одна треть суммы, состоящей из вектора A плюс вектор B (повернутый по часовой стрелке на 120°) и плюс вектор C (повернутый по часовой стрелке на 120°), дает вектор A_1 .

Для вычисления A_2 к уравнению (5) прибавим уравнение (6), предварительно умноженное на a^2 , и уравнение (7), умноженное на a . В результате получим.

$$(8) \quad U_{A0} = \frac{1}{3}(U_A + U_B + U_C)$$

$$U_{A1} = \frac{1}{3}(U_A + aU_B + a^2U_C)$$

$$U_{A2} = \frac{1}{3}(U_A + a^2U_B + aU_C)$$

Метод применяется главным образом для нахождения токов короткого замыкания при различных аварийных режимах в разветвленных электрических системах электроснабжения и оценки состояния электроустановки (асинхронных электродвигателей и трансформаторов).

Благодаря высокой точности и дискретизации, а также синхронизации измерений с глобальными навигационными системами данные СМПП могут эффективно применяться при выполнении следующих задач: - верификация расчетных динамических моделей; мониторинг локальных и межзональных колебаний, идентификация параметров колебаний; оценивание состояния; исследование динамических свойств энергосистемы; визуализация динамики изменения параметров электроэнергетического режима в масштабах всей энергосистемы; мониторинг перетоков мощности в контролируемых сечениях; расчет параметров схемы замещения ЛЭП в режиме реального времени; мониторинг состояния оборудования; управление электрическим режимом по углу; мониторинг запасов устойчивости; мониторинг технологических возмущений в режиме реального времени; создание систем управления нового поколения, позволяющих учитывать в реальном времени изменения параметров расчетных моделей единой системы электроснабжения, основанных на законах регулирования элементов и динамических характеристиках систем электроснабжения. На рис. 4 показано формирование вектора измерения электрической величины.

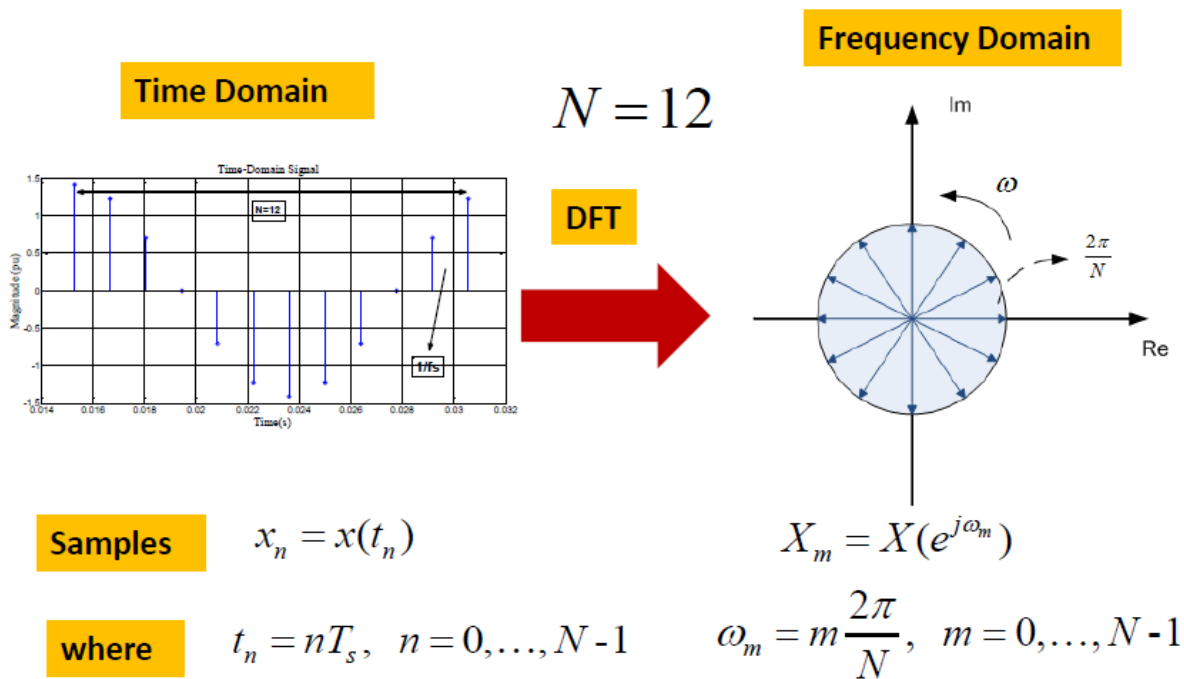


Рис 4. Получение векторного измерения

Предположим, что было больше информации об ошибках ε в системе управления электроснабжением описано в форме ковариационной матрицы.

$$(9) \quad E\{\varepsilon\varepsilon^T\} = W$$

Даже в простом случае, где W - диагональное уравнение

$$(10) \quad E\{(y - A\bar{x})^T W^{-1}(y - A\bar{x})\} = y^T W^{-1} y - 2y^T W^{-1} A\bar{x} - \bar{x}^T A^T W^{-1} A\bar{x}$$

у которого есть решение

$$(11) \quad \bar{x} = (A^T W^{-1} A)^{-1} A^T W^{-1} y$$

Если W - диагональная матрица, тогда, целевая функция:

$$(12) \quad E\{(y - A\bar{x})^T W^{-1}(y - A\bar{x})\} = \sum \frac{(y_1 - \bar{y}_1)^2}{W_n}$$

Таким образом, на основе полученных векторных измерений параметров электроэнергетического режима можно развивать инновационные принципы мониторинга состояния энергетического оборудования, управления электроэнергетическим режимом и создавать современные интеллектуальные системы управления ЭЭС

В дополнение к измеряющемуся напряжению на шине РМУ может измерить токи в линиях, связанных с шиной. Фактическое измерение - одна из действительных и мнимых частей напряжения шины и линейных токов. Это означает, что РМУ измеряет величину и угол линейных токов (которые являются нелинейными функциями системы).

Выводы

При разработке системы оценки состояния электрооборудования были использованы методы векторных измерений и симметричных составляющих применимые не только для измерения электрических величин, но и для использования в цифровых подстанциях. Осуществление перехода к передаче векторных сигналов в цифровом виде на всех этапах управления ПС позволит получить целый ряд преимуществ, в том числе:

Существенно сократить затраты на кабельные вторичные цепи и каналы их прокладки, а это повлечет за собой уменьшение длины сигнальных кабелей и занимаемую цифровой подстанцией площадь примерно на 20-30%.

Повысить электромагнитную совместимость современного вторичного оборудования – микропроцессорных устройств и вторичных цепей благодаря переходу на оптоволокно, что в настоящее время используется только в единичных случаях.

Работа осуществлялась в рамках компонентного проекта Минобрнауки России №10.331-17 «Моделирование и интеллектуальное управление производственными процессами в промышленности и электроэнергетике».

Литература

1. Моржин Ю.И. Цифровая подстанция - важный элемент интеллектуальной энергосистемы. Презентация. URL: <http://www.ntc-power.ru/upload/presentation/CPS-%20intellectual%20grid%20element.pdf> (дата обращения: 12.05.2019).
2. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Кодолов Н.Г., Шульгин М.С. Моделирование первичных преобразователей информации устройств синхронизированных векторных измерений. // МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ 2014 № 1 (21) с. 57-65.
3. Phadke A. G. and Thorp J. S. "Synchronized phasor measurements and their applications," New York, Springer, 2008. Reference book on automatic control theory / Pod red. A.A. Krasovskogo. М.: Nauka, 1987. 712 p.