

П. И. Бартоломей, С. И. Семененко
**ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Прези-
дента**
России Б.Н.Ельцина» (г. Екатеринбург, Россия)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ УСКОРЕННЫХ РАСЧЕТОВ РЕЖИМОВ ЭЭС

На кафедре «Автоматизированные электрические системы» УрФУ в рамках научных исследований в области совершенствования и развития диспетчерского управления на основе векторного управления и векторных измерений разработаны методы ускоренных расчетов электрических режимов применительно к задачам противоаварийного управления. В настоящее время обобщаются результаты разработки и тестовых испытаний разработанных алгоритмов, основанных на преобразовании матрицы проводимостей к треугольному виду и использовании векторных измерений при помощи устройств PMU – Phasor Measurement Unit.

Развитие и совершенствование управления большими энергообъединениями на основе новых компьютерных и информационных технологий ориентируется на применение синхронизированных измерений векторных величин параметров электрического режима. Основой широкомасштабной измерительной системы WAMS (Wide Area Measurement System) в ЭЭС являются упомянутые устройства PMU. Пока в отечественной практике PMU подключаются непосредственно к измерительным цепям электромагнитных трансформаторов тока и напряжения, а также к источнику сигнала точного времени, от которого и осуществляется синхронизация измерений PMU. В качестве источника сигнала точного времени используется спутниковая навигационная система GPS или ГЛОНАСС.

Такая измерительная система хотя и обеспечивает получение мгновенных значений тока и напряжения, которые программно превращаются в векторное отображение соответствующих комплексных величин, но не позволяют добиться необходимой точности синхронизации. С этой точки зрения более эффективно использование оптических измерительных трансформаторов тока и напряжения.

Полноценное использование информации, получаемой при помощи PMU, дает возможность на новом качественном уровне решать различные задачи, в том числе способно обеспечить существенное снижение времени расчёта режимов, что особенно актуально в оперативных расчётах on-line, в системах противоаварийной автоматики, работающих в режиме ДО и мониторинга устойчивости при малых колебаниях [1].

Измерение комплексных величин тока и напряжения по первой гармонике (модуль и фаза) с высокой точностью при присоединении PMU к оптическим измерительным трансформаторам тока и напряжения, во-первых, существенно повышает эффективность достоверизации телеметрии в результате решения задачи оценивания состояния ЭЭС, во-вторых, открывает новые возможности в противоаварийном управлении.

Ниже обсуждаются наиболее важные результаты разработки алгоритма суперускоренного расчета режима электрической сети большой размерности на основе решения традиционной системы уравнений установившегося режима как в линейной форме узлового баланса токов

$$Y \cdot \bar{U} = \bar{I}, \quad (1)$$

так и в нелинейной форме баланса мощностей

$$diag(\bar{U}) \cdot Y \cdot \bar{U} = \bar{S}. \quad (2)$$

На основании алгоритма эквивалентного преобразования линеаризованных уравнений установившегося режима ЭЭС [2-4] производится смена расположения строк и столбцов, что приводит получившуюся систему к матрично-блочному виду

$$\begin{bmatrix} Y_A & Y_B \\ Y_C & Y_\Delta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_p \\ \bar{U}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где Y_A – левая верхняя квадратная, Y_B – правая верхняя прямоугольная, Y_C – левая нижняя прямоугольная, Y_Δ – нижняя треугольная матрицы. Здесь \bar{U}_p – вектор (множество) комплексных измеренных напряжений узлов при помощи PMU.

Соответственно, нелинейная система уравнений (2) приобретает вид

$$diag\left(\begin{bmatrix} \bar{U}_a \\ \bar{U}_b \end{bmatrix}\right) \cdot \begin{bmatrix} Y_A & Y_B \\ Y_C & Y_\Delta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_p \\ \bar{U}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_p \\ \bar{S}_q \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Покажем получение расчётных значений комплексных значений напряжений, входящих в множество \bar{U}_q на примере линейной системы (3). Если узловые инъекции \bar{I}_b получать традиционно из системы SCADA, то расчётные значения напряжений узлов, не имеющих PMU, могут быть получены решением системы уравнений

$$Y_\Delta \cdot \bar{U}_q = \bar{I}_b - Y_C \cdot \bar{U}_p. \quad (5)$$

Характерной особенностью полученной системы уравнений является запись её через нижнюю треугольную матрицу Y_Δ , что и обеспечивает эффект супер-ускоренного расчёта электрического режима ЭЭС. Дело в том, что из первого уравнения системы (5) находится единственная неизвестная переменная, пусть это будет U_{qi} . Найденное значение этой переменной подставляется во все нижестоящие уравнения, в которых эта переменная фигурирует. Следовательно, во втором уравнении остаётся также одна единственная переменная, пусть это будет U_{qj} . Поскольку найденное значение этой переменной легко подставляется также во все нижестоящие уравнения, то тем самым обеспечивается вычисление каждой следующей переменной и так далее до исчерпания всех переменных множества q . При нелинейной постановке задачи соответствующая система уравнений с треугольной матрицей Y_Δ как и без измерений при помощи PMU решается итерационным методом.

Вторая важная особенность системы (5) состоит в том, что выявляемое алгоритмом множество p узлов с PMU за счёт использования традиционных электромагнитных измерений инъекций тока или мощности оказывается меньше, чем при оптимальной расстановке PMU с обеспечением полной наблюдаемости [6], что, естественно, важно с экономической точки зрения.

Для иллюстрации рассмотрим девятиузловую электрическую сеть, приведенную на рисунке 1. В соответствии с разработанным алгоритмом преобразование приведет линейную модель (1) к треугольному виду (5), в котором вектор напряжений будет разбит на два подвектора \bar{U}_p и \bar{U}_q . Первый из них отражает множество p напряжений узлов {9,1,2}, содержащих PMU, второй – множество q узлов {4,7,3,5,8,6}, не содержащих PMU.

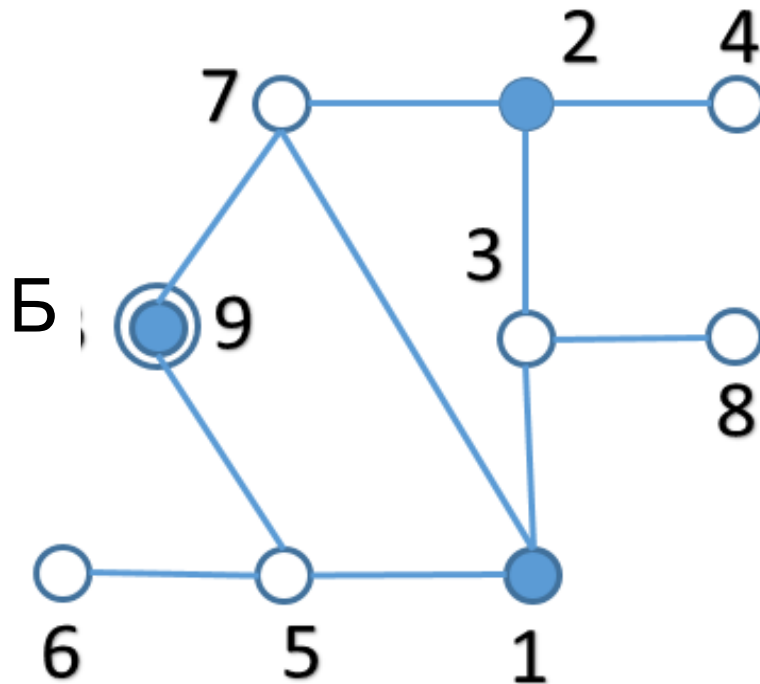


Рисунок 1. Топология исследуемой сети.

Данный алгоритм был протестирован на находящихся в открытом доступе схемах польской энергосистемы: CASE2383WP (2000г., зимний пик, 2383 узла, получено 352 PMU), CASE2736SP (2004г., летний пик, 2736 узлов, получено 389 PMU), CASE3120SP (2008г., летний пик, 3120 узлов, получено 436 PMU).

Отметим, как это было заявлено выше, что алгоритм [2-4] приводит не только к наблюдаемости сети и ускоренным расчетам электрического режима, но и выполняет функцию минимизации количества устанавливаемых устройств PMU. Например, в сети IEEE-118 необходимо поставить PMU в 28 узлах вместо 32, как это получается в лучших зарубежных алгоритмах.

Кроме того, он был протестирован для схем IEEE с целью сопоставления его результатов с результатами действия алгоритмов [5]. Например, для сетей IEEE-57 и IEEE-118 (из названия видно общее количество узлов) вместо оптимального числа узлов с PMU по полной наблюдаемости 12 и 32, получается соответственно 9 и 28 узлов с PMU, обеспечивающих ускоренный расчёт режима. Более того, можно показать, что формирование «псевдофазорных измерений» напряжений при помощи их вычислений на основе измерений токов линий, отходящих от узлов с PMU, достигается как ускорение расчёта потокораспределения в сети, так и дополнительное существенное уменьшение числа устанавливаемых PMU.

Наиболее важным является сопоставление с алгоритмом [6], также приводящему к некоторому ускорению получения потокораспределения в электрической сети в связи с обеспечением наблюдаемости только при помощи PMU и полном отказе от традиционной телеметрии, что, естественно, приводит к существенному возрастанию затрат на телеметрию.

Заключение. В задачах противоаварийной автоматики больших энергосистем существенным фактором является увеличение скорости принятия решения по определению управляющих воздействий в режиме on-line. Векторные измерения дают новые возможности для векторного управления. Специальное размещение устройств PMU обеспечивает супер-ускоренные расчеты режима электрической системы.

Разработанный алгоритм специального размещения устройств PMU обеспечивает супер-ускоренные расчеты режима ЭЭС. Работоспособность алгоритма проверена на ряде тестовых задач большой размерности, в том числе для электрических систем, имеющих более 3000 узлов. Показано, что необходимое число PMU меньше, чем получается в известных алгоритмах оптимального размещения измерительных комплексов по критерию обеспечения полной наблюдаемости. Это достигается за счет частичного использования измерений узловых токов и мощностей из SCADA.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что предложенные в [3-5] алгоритмы, успешно способны выполнить минимизацию количества PMU и обеспечение наблюдаемости и ускоренного расчёта установившегося режима сети без решения какой-либо системы уравнений. Сказанное относится не только к моделям ЭЭС в форме систем линейных комплексных уравнений баланса токов, но и моделям, заданным в форме систем нелинейных комплексных уравнений баланса мощностей.

В работе предлагается метод выбора мест размещения PMU, позволяющий существенно ускорить on-line расчеты режимов в задачах диспетчерского управления. По сравнению с ранее выполненными и опубликованными результатами удается добиться значительного снижения времени расчета установившегося режима ЭЭС за счет выделения треугольного блока в матрице проводимостей. Методом исследования при выполнении экспериментальной части являлось математическое моделирование. В качестве инструмента моделирования применялось программное обеспечение MATLAB.

Список использованных источников

1. Аюев Б.И., Жуков А.В. Новые подходы к мониторингу запаса устойчивости электроэнергетических систем // Энергосистема: управление; конкуренция, образование : сборник. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2008. Т. 1. с. 9 – 15.
2. Bartolomey P.I., Eroshenko S. A., Semenenko S. I. & Suvorov A. A. PMU-based Informational Support of Power System Control Tasks// Energy Production and Management in the 21st Century: The Quest for Sustainable Energy (2 V. Set). 2014. Vol. 1. Pp. 190-206.
3. Бартоломей П.И., Плетнёва Л.В. Оптимизация расстановки устройств PMU для ускоренных расчетов режимов ЭЭС //Электроэнергетика глазами молодежи: научные тр. IV международной НТК: Сб. статей в 2 т. Новочеркасск, 2013. Т.2, с. 128 – 132.
4. Бартоломей П.И., Семенов С.И. Расстановка PMU для ускоренных расчетов режима ЭЭС по критерию минимизации затрат //Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды V международной НТК: Сб. статей в 2 т. Томск, 2014. Т.1, с. 295 – 298.
5. Бартоломей П.И., Семенов С.И. Минимизация количества векторных измерений для ускоренных расчетов режимов ЭЭС //Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды VI международной НТК: сборник статей в 2 т. Иваново, 2015. Т.1, с. 207 – 212.
6. Baldwin T.L., Mili L., M.B.Boisen, R.Adapa. Power System Observability with Minimal Phasor Measurement Placement// IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, No. 2, May 1993. P.707-715.