

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

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ ЭЭС НА ОСНОВЕ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Относительно недавно появившиеся технологии векторных измерений в электроэнергетических системах открывают новые возможности в совершенствовании противоаварийной автоматики, использующей принцип «До», в которой основные вычисления выполняются до момента возникновения аварийной ситуации. Эти технологии основываются на широкомасштабной распределенной измерительной системе Wide Area Measurement System – WAMS, главными элементами которой являются измерительные устройства PMU (Phasor Measurement Unit), способные измерять параметры электрической сети с точной привязкой к астрономическому времени. Как известно, внедрение WAMS – PMU стало возможным благодаря повсеместному разворачиванию систем спутниковой навигации GPS и ГЛОНАСС, которые позволяют синхронизовать встроенные часы измерительного устройства с точностью до 1 мкс.

Важнейшее достижение в использовании PMU состоит не только в высокой точности измерений параметров режима в различных точках протяженной электрической системы, какой является, например, ЭЭС России. Измерение мгновенных величин амплитуды напряжения и тока позволяет определить практически для одного момента времени фазы напряжения и тока в местах установки измерительных комплексов, что и обусловило возможность говорить о векторном измерении параметров режима 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.

Полноценное использование информации, получаемой при помощи PMU, позволяет не только определять достоверные значения параметров сетевых элементов, но и на новом качественном уровне решать различные задачи, в том числе способно обеспечить существенное снижение времени расчета режимов, что особенно актуально в оперативных расчетах онлайн и в системах противоаварийной автоматики. Как известно, в этих системах за короткое время цикла опроса источников телеметрии необходимо по текущим данным телеметрии определить дозировки управляющих воздействий, гарантирующих сохранение устойчивости ЭЭС в случае возникновения любой из множества запрограммированных аварийных ситуаций.

Существующая до сих пор проблема высокой стоимости PMU привела к необходимости решения задачи оптимальной расстановки этих устройств в ЭЭС. Ранее в литературе рассматривались различные алгоритмы поиска мест размещения PMU, в том числе предназначенные для уменьшения количества устройств, то есть с минимизацией затрат на их приобретение и установку, но с обеспечением полной наблюдаемости ЭЭС.

В отличие от этих алгоритмов, ниже рассматривается расстановка PMU, обеспечивающая не только наблюдаемость ЭЭС, но и минимальное время расчета установившегося режима по данным телеметрии, хотя при этом частично используются и традиционные телеизмерения узловых инъекций [1–3]. Такой подход приводит к эко-

номии затрат на установку измерительных комплексов. Эффект существенного снижения времени расчета установившегося режима ЭЭС достигается за счет матрично-блочного преобразования линейной системы уравнений установившегося режима в форме баланса токов

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

где Y – матрица проводимостей ЭЭС ($\dim(Y) = N \times N$, где N – число узлов в электрической сети);

\bar{U} – вектор напряжений узлов;

\bar{I} – вектор токов инцидентий узлов.

Все величины для модели сети переменного тока являются комплексными. Разработанные алгоритмы осуществляют перестановку строк и столбцов матрицы Y и формирование новых векторов \bar{U} и \bar{I} , отражающих подмножества узлов, содержащих и не содержащих РМУ. Обозначим как p подмножество узлов, в которых установлены РМУ, $\dim(p) = n$, соответственно, q – подмножество остальных узлов без РМУ, $\dim(q) = m$. Отсюда следует, что $N = n + m$.

Как известно, матрично-блочное представление системы уравнений (1) в общем виде выглядит следующим образом:

$$Y_{11} \cdot \bar{U}_1 + Y_{12} \cdot \bar{U}_2 = \bar{I}_1, \quad (2)$$

$$Y_{21} \cdot \bar{U}_1 + Y_{22} \cdot \bar{U}_2 = \bar{I}_2. \quad (3)$$

В этих матрично-блочных уравнениях подматрицы Y_{11} и Y_{22} – квадратные матрицы размерностью $(n \times n)$ и $(m \times m)$. Две другие прямоугольные подматрицы Y_{12} и Y_{21} имеют размерности $(n \times m)$ и $(m \times n)$. Если подвекторы \bar{U}_1 и \bar{U}_2 соответствуют напряжениям узлов типа p и q , то на основании информации от РМУ об определяющих напряжениях \bar{U}_p могут быть вычислены неизвестные величины \bar{U}_q из (3), как

$$\bar{U}_q = Y_{22}^{-1} \cdot (\bar{I}_2 - Y_{21} \cdot \bar{U}_p). \quad (4)$$

Сказанное справедливо, если при этом известна информация о токовых инцидентиях \bar{I}_2 , хотя бы на основе традиционных электромагнитных измерений. Для исключения из алгоритма громоздкой процедуры обращения матрицы и определения \bar{U}_q необходимо перейти к решению системы из m уравнений

$$Y_{22} \cdot \bar{U}_q = (\bar{I}_2 - Y_{21} \cdot \bar{U}_p). \quad (5)$$

Покажем, что существенный эффект ускорения расчета режима достигается при использовании алгоритма формирования треугольной подматрицы $Y_{22} = Y_{\Delta}$. Для иллюстрации рассмотрим восьмиузловую электрическую сеть, приведенную на рис. 1(а). На рисунке 1(б) показана точечная диаграмма исходной матрицы проводимостей Y , в которой выделенный блок соответствует матрице Y в системе (1). С учетом того, что напряжение балансирующего узла восемь должно быть задано.

На основании алгоритма преобразования системы (1) уравнений установившегося режима ЭЭС [3] производится смена мест строк и столбцов:

$$\begin{aligned} \{Y \cdot \bar{U} = \bar{I}\} &\Leftrightarrow \{(M_1 \cdot Y \cdot M_2) \cdot (M_2^{-1} \cdot \bar{U}) = (M_1 \cdot \bar{I})\} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \{(M_1 \cdot Y \cdot M_2) \cdot (M_2^{-1} \cdot \bar{U}) = (M_1 \cdot \bar{I})\} \Leftrightarrow \{Y_0 \cdot \bar{U}_0 = \bar{I}_0\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где M_1 и M_2 – матрицы перестановок строк (M_1) и столбцов (M_2) исходной матрицы Y ;

Y_0 – новая матрица проводимостей, после перестановок строк и столбцов;

\bar{U}_0 – новый вектор напряжений после перестановок столбцов в матрице Y ;
 \bar{I}_0 – новый вектор токов, полученный после перестановки строк матрицы Y .

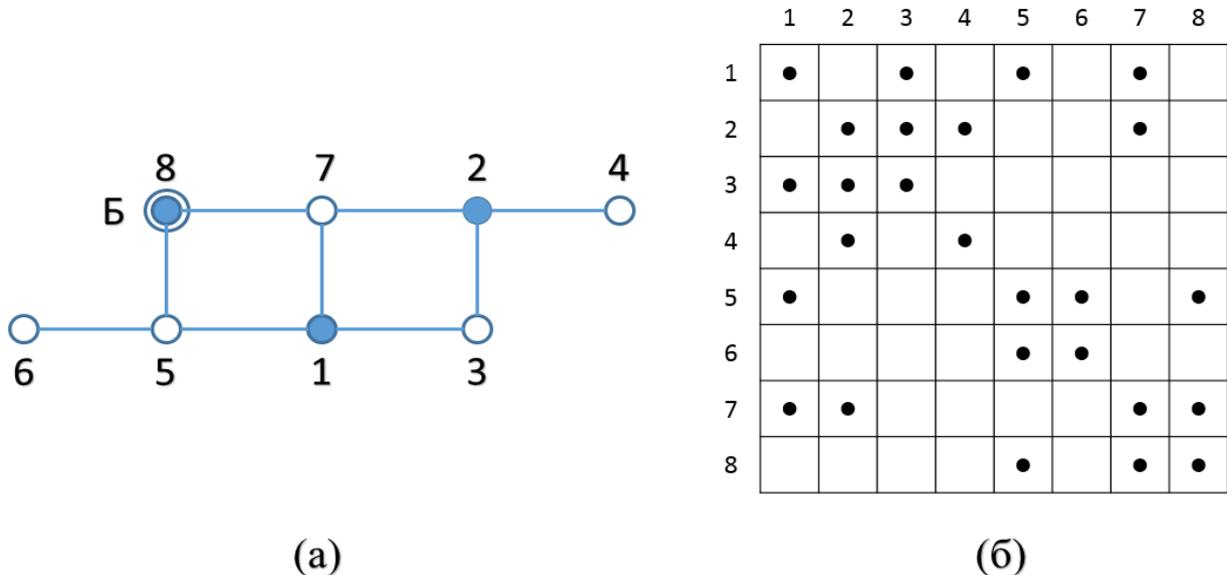


Рис. 1. Схемы восьмиузловой электрической сети: (а) топология исходной сети, (б) соответствующая точечная диаграмма матрицы Y

Для рассматриваемой сети данное преобразование приводит линейную модель (1) к матрично-блочному виду

$$Y_0 \cdot \bar{U}_0 = \bar{I}_0. \tag{7}$$

показанному на рисунке 2. Из рисунка следует, что вектор напряжений можно разбить на два подвектора . Первый из них отражает множество p напряжений узлов (8, 1, 2), содержащих РМУ, второй – множество q узлов (3, 4, 7, 5, 6), не содержащих РМУ. Искомыми переменными являются напряжения \dot{U}_{qj} , расположенные в диагонали нижней треугольной подматрицы. В данном примере таких искомых переменных пять, а именно $\dot{U}_3, \dot{U}_4, \dot{U}_7, \dot{U}_5, \dot{U}_6$.

Если напряжения \dot{U}_8, \dot{U}_1 и \dot{U}_2 измерены, то есть известны компоненты вектора \bar{U}_p , а также узловые токовые инъекции $\dot{I}_3, \dot{I}_4, \dot{I}_2, \dot{I}_1, \dot{I}_5$, образующие вектор \bar{I}_b , то напряжения всех остальных узлов с номерами 3, 4, 7, 5, 6 можно вычислить из блочной группы уравнений для \bar{U}_q :

$$Y_\Delta \cdot \bar{U}_q = \bar{I}_0 - Y_C \cdot \bar{U}_p \tag{8}$$

Из полученной структуры УУН видно, что из 1-го по записи уравнения для 3-го узла в треугольном блоке можно найти напряжение \dot{U}_3 , из следующего нижестоящего уравнения вычислить и т. д. для всех остальных узлов 2, 1, 5. Таким образом, благодаря сделанной перестановке строк и столбцов в системе уравнений (1) обеспечивается возможность определения напряжений множества узлов q , не имеющих РМУ, без решения системы уравнений, каждый раз последовательно решая одно уравнение с одной неизвестной переменной. В демонстрируемом примере вместо системы из семи уравнений (см. рис. 1) последовательно решаются пять уравнений, в каждом из которых содержится одна искомая комплексная величина.

Так как для переменного тока все величины являются комплексными, для реализации алгоритма сверхускоренных расчетов режима должна использоваться система так называемых векторных измерений (модулей и фаз напряжений).

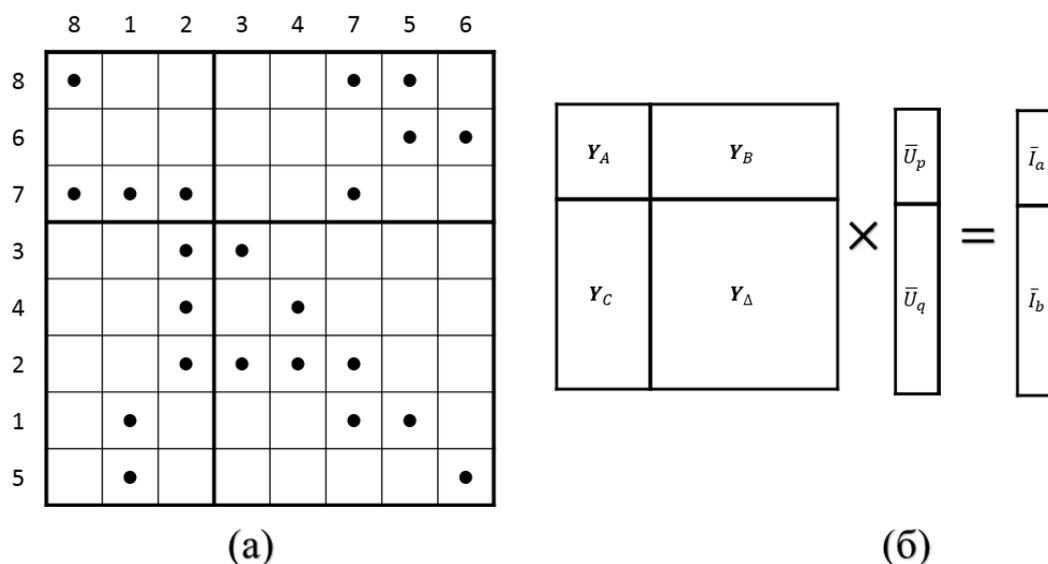


Рис. 2. Формирование треугольной подматрицы для блочной структуры уравнений узловых напряжений (УУН): (а) точечная диаграмма матрицы Y , (б) матрично-блочный вид линейной модели

Данный алгоритм был протестирован на нескольких тестовых схемах IEEE с числом узлов от 14 до 118, а также находящихся в открытом доступе схемах польской энергосистемы: CASE2383WP (2000 г., зимний пик, 2383 узла, получено 352 PMU), CASE2736SP (2004 г., летний пик, 2736 узлов, получено 389 PMU), CASE3120SP (2008 г., летний пик, 3120 узлов, получено 436 PMU).

Отметим, как это было заявлено выше, что алгоритм не только приводит 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.

Заключение. В задачах противоаварийной автоматики больших энергосистем существенным фактором является увеличение скорости принятия решения по определению управляющих воздействий в режиме онлайн. Векторные измерения дают новые возможности для векторного управления. Специальное размещение устройств PMU обеспечивает суперускоренные расчеты режима ЭЭС.

Список использованных источников

1. 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.
2. Бартоломей П. И., Плетнёва Л. В. Оптимизация расстановки устройств PMU для ускоренных расчетов режимов ЭЭС // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. IV междунар. НТК: Сб. статей в 2 тт. Т. 2, Новочеркасск, 2013. с. 128–132.
3. Бартоломей П. И., Семененко С. И.. Расстановка PMU для ускоренных расчетов режима ЭЭС по критерию минимизации затрат // Электроэнергетика глазами молодежи: научн. тр. V междунар. НТК: Сб. статей в 2 тт. Т. 1, Томск, 2014. с. 295–298.