

Алгоритмы синтеза наблюдаемости электроэнергетических систем на основе синхронизированных векторных измерений¹

ГОЛУБ И.И., ХОХЛОВ М.В.

Представлен подход к синтезу топологической наблюдаемости с использованием устройств синхронизированных измерений векторных величин (Phasor Measurement Unit – PMU) и показано, что алгоритм оценки топологической наблюдаемости является общим для традиционных и PMU измерений. Предлагаются алгоритмы выбора оптимальной расстановки PMU по критерию качества наблюдаемости, обусловленного инвариантными к режиму факторами. Предложенные модификации алгоритмов выбора минимального числа PMU, размещаемых в узлах и связях электрической сети, гарантируют наблюдаемость в нормальных условиях функционирования, при отключении отдельных связей и выпадении отдельных PMU. На примерах тестовых энергосистем дается сравнение алгоритмов синтеза наблюдаемости на основе PMU, размещаемых в узлах и связях.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, оценивание состояния, топологическая наблюдаемость, качество наблюдаемости, сенсоры

Задача статического оценивания состояния электроэнергетической системы (ЭЭС) заключается в вычислении по измеренным значениям \bar{Z} переменных режима оценок модулей и фаз напряжений во всех узлах, являющихся элементами вектора состояния X .

Для получения решения используется система уравнений [1]:

$$R_z^{-1/2}[\bar{Z} - Z(X)] = 0, \quad (1)$$

в общем случае несовместная из-за наличия погрешностей измерений; роль диагональной матрицы дисперсий ошибок измерений R_z существенна только в случае, когда система (1) переопределена.

Для традиционных измерений, включающих измерения перетоков активной и реактивной мощности, узловых мощностей, модулей узловых напряжений, такая система является нелинейной, поэтому она решается методом последовательной линеаризации, разложением (1) в ряд Тейлора в окрестности точки X_k , где k – номер текущей итерации.

В линеаризованном виде система (1) может быть представлена как

$$R_z^{-1/2}[\bar{Z} - Z(X_k)] - R_z^{-1/2} \frac{\partial Z}{\partial X} DX_{k+1} = 0, \quad (2)$$

где $DX_{k+1} = Z_{k+1} - Z_k$, $DZ = (\bar{Z} - Z(X_k))$, $Z(X_k)$ – оценка измеренной переменной на k -й итерации.

Будем считать число уравнений измерений равным m , а число переменных состояния равным n .

Производную от измеренных переменных по вектору состояния $\frac{\partial Z}{\partial X} = H$ принято называть матрицей наблюдаемости. Запишем систему (2) на последнем шаге итерационного процесса:

$$R_z^{-1/2} HDX = R_z^{-1/2} DZ. \quad (3)$$

Если ранг матрицы наблюдаемости равен числу оцениваемых переменных состояния, то система (3) имеет единственное решение при числе уравнений измерений, равном n , и единственное обобщенное решение при числе уравнений измерений, большем n .

Таким образом, условие равенства ранга матрицы наблюдаемости числу оцениваемых параметров состояния является необходимым и достаточным условием существования решения линеаризованной системы уравнений измерений (3). Критерии и алгоритмы анализа наблюдаемости можно разбить на два класса: топологические и алгебраические.

Анализ и синтез топологической наблюдаемости на основе традиционных измерений. В основе топологического алгоритма анализа наблюдаемости [2, 3], проводящегося независимо для активной и реактивной моделей ЭЭС, лежит построение на графе сети дерева измерений, каждая ветвь которого объединена с одним из имеющихся измерений. На первом этапе алгоритма по измерениям перетоков мощности определяется состав ветвей дерева измерений методом построения максимального покрывающего дерева. Если при этом не будет установлена наблюдаемость ЭЭС, то алгоритм переходит ко второму этапу, заключающемуся в определении дерева измерений методом поиска максимального паросочетания на бихроматическом графе [4], узлы одного цвета которого соответствуют измеренным инъекциям мощности, а второго – ветвям графа сети.

¹ Работа выполнена в рамках Интеграционного проекта СО РАН №01201260514 (2012–2014 гг.) при поддержке гранта ведущей научной школы НШ-4711.2014.8 и программы фундаментальных исследований УрО РАН, проект № 12-С-7-1008.

Если будет установлено, что ЭЭС ненаблюдаема, то в ней могут быть выделены наблюдаемые и ненаблюдаемые подсистемы либо определены дополнительные измерения, которые должны быть добавлены для обеспечения наблюдаемости. Измерения, поставленные в соответствие ветвям деревьев измерений и их корневым узлам, названы в [1] базисными измерениями, остальные измерения являются избыточными. Указанные задачи анализа и синтеза топологической наблюдаемости ЭЭС успешно решаются с помощью комплекса программ [5].

Анализ и синтез топологической наблюдаемости на основе синхронизированных векторных измерений. Алгоритмы анализа топологической наблюдаемости без какого-либо изменения могут использоваться и при решении проблемы оценивания состояния на основе новой технологии синхронизированных векторных измерений, осуществляемых устройствами PMU (Phasor Measurement Unit). Возможна организация измерительной системы на базе PMU в узлах, включающей измерения вектора напряжения в узле установки PMU и векторов токов в смежных связях, либо структура PMU измерений в связях, содержащая измерение вектора напряжения в узле и вектора тока в одной из смежных связей.

Поскольку зависимость напряжений от токов линейная, такой состав измерений позволяет записать выражение (3) в виде линейного уравнения, связывающего измерения Z с переменными состояния X , которые удобно представлять в виде активной и реактивной составляющих узловых напряжений:

$$R_z^{-1/2} HX = R_z^{-1/2} Z. \quad (4)$$

Алгоритмы и программа синтеза топологической наблюдаемости на основе традиционных измерений также могут использоваться при расширении существующей системы измерений PMU измерениями. Для этого после выделения подсистем деревьев измерений на базе традиционных измерений для размещения PMU выбираются узлы или связи, позволяющие объединить максимальное число подсистем деревьев измерений, затем проводится коррекция дерева измерений и выбор места размещения очередного PMU.

В то же время, задача выбора минимального числа PMU обоих типов заинтересовала многих ученых. В [6] дается обзор первых работ, связанных решением этой проблемы, и предлагаются алгоритмы выбора минимального числа PMU первого и второго типов, обеспечивающих топологическую наблюдаемость в нормальных условиях функционирования (*задача 1*); при возможных отключениях отдельных связей (*задача 2*); при выходе из строя отдельных PMU (*задача 3*). Указанные алгоритмы

позволяют учесть имеющиеся в системе традиционные измерения и нулевые инъекции.

В *задаче 1* наблюдаемость каждого узла должна быть обеспечена измерениями, по крайней мере, одного PMU, а в *задаче 3* – двух PMU. В *задаче 2* требование двукратной наблюдаемости предъявляется только к узлам без PMU, наблюдаемость висячих узлов достаточно обеспечить измерениями одного PMU.

В основе алгоритмов синтеза наблюдаемости лежит процедура целочисленного линейного программирования:

$$\begin{aligned} \min & f^T y \\ & y \\ & Ay \leq g. \end{aligned} \quad (5)$$

Элементы вектора решения y , равные единице, указывают, в каких узлах или связях следует установить PMU.

В качестве матрицы A при выборе PMU первого типа в *задачах 1* и *3* выступает матрица смежности узлов с единичной диагональю, а в *задаче 2* – матрица смежности, диагональные элементы которой равны двум. Применение матрицы смежности для решения *задачи 2* позволяет избежать случаев получения неоптимального решения, которые имели место в [6], где в качестве матрицы A выступала транспонированная первая матрица инцидентий.

При решении *задачи 1* для PMU второго типа матрицей A является первая матрица инцидентий, а в *задаче 3* она образуется путем их горизонтального сочленения (присоединением справа к матрице инцидентий ее копии). Использование такой расширенной матрицы допускает размещение в каждой связи двух PMU – в начале и конце. Матрица A , используемая в *задаче 2*, строится аналогичным образом, только в левой матрице инцидентий значения ненулевых элементов, соответствующих узлам начала связей, устанавливаются равными двум, а в правой матрице значения два принимают элементы, соответствующие узлам конца связей. В отличие от *задач 1* и *3* решение *задачи 2* задает положение PMU относительно узлов связи.

Длина векторов f и g определяется размерами матрицы A , вектор f – единичный, элементы вектора g для всех узлов в *задаче 1* и для висячих узлов в *задаче 2* равны единице, в остальных случаях они равны двум.

Такая модернизация алгоритмов исключает необходимость в проводимом в [6, 7] апостериорном анализе решения, который включает выявление избыточных PMU, их исключение и в случае необходимости коррекцию решения. При выборе PMU с учетом традиционных измерений, требующим коррекции элементов матрицы A , использование процедуры (5) не гарантирует оптимального решения, поэтому она дополняется апостериорным анализом.

где g_{kl} , b_{kl} и g_{kkl} , b_{kkl} – продольные и поперечные проводимости связи; k_{kl} , k_{lk} – коэффициенты трансформации трансформатора, расположенного у узлов k или l , если связь трансформаторная.

При измерении векторов токов с двух концов каждой связи и векторов напряжений во всех узлах матрица наблюдаемости H будет содержать $4m + 2n$ уравнений, где n – число узлов, m – число связей в графе сети.

На рис. 2 показаны значения следа ковариационной матрицы для одного из возможных составов РМУ второго типа, гарантирующих топологическую наблюдаемость при потере отдельных РМУ, и состава, отличающегося от него, установкой РМУ в начале или в конце связи (полагалось, что $R_z = 1$). Перестановка РМУ из начала связи в ее конец и наоборот не влияет на топологическую наблюдаемость и позволяет уменьшить след ковариационной матрицы на 1–2 порядка.

Такой прием улучшения обусловленности не применим для РМУ первого типа или решения задачи 2, когда топологическая наблюдаемость зависит от узла размещения РМУ.

Вместе с тем принципиальная возможность улучшения качества наблюдаемости за счет коррекции размещения РМУ существует и в этих случаях.

Максимальные дисперсии оценок присущи так называемым сенсорным переменным состояниям, которые могут быть определены по результатам спектрального разложения информационной матрицы

$$P_x^{-1} = \mathcal{L} V^T = \sum_{i=1}^k \mathbf{e}_i \lambda_i^{-1} \mathbf{v}_i^T, \quad (8)$$

где V – ортонормированная матрица собственных векторов; \mathcal{L} – диагональная матрица упорядоченных по возрастанию собственных значений $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3 < \dots < \lambda_n$.

Если первое собственное значение λ_1 существенно меньше остальных собственных значений, то

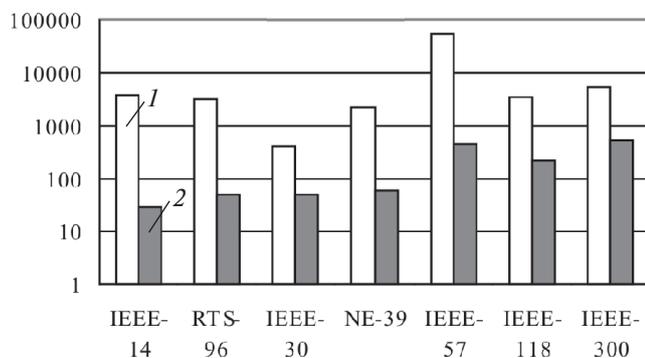


Рис. 2. Значения следа ковариационных матриц (логарифмическая шкала) для семи IEEE тестовых схем ЭЭС при решении задачи 3 для РМУ второго типа без учета (1) и с учетом (2) коррекции их положения, улучшающей качество наблюдаемости

максимальный вклад погрешностей измерений DZ в ошибки оценок переменных состояния DX будет в узлах, соответствующих максимальным компонентам первого собственного вектора, связанного с минимальным собственным значением:

$$DX^1 = \mathbf{v}_1 \mathbf{v}_1^T / \lambda_1 H^T R_z^{-1} DZ = \mathbf{v}_1 DS^1, \quad (9)$$

где величина DS^1 получила название первого обобщенного возмущения, каждому из возможных значений которого соответствуют различные варианты погрешностей измерений [9].

Максимальные компоненты первого собственного вектора указывают на направление максимальной неопределенности. Снижение влияния погрешностей измерений на погрешности оценок достигается добавлением дополнительных измерений в этом направлении.

Впервые идея улучшения качества наблюдаемости невырожденной системы (3) добавлением измерений в направлении максимальной неопределенности предложена в [10], где было показано, что вектором, наиболее ортогональным к нормированным столбцам матрицы наблюдаемости, является собственный вектор, связанный с минимальным собственным значением информационной матрицы.

Измерение, которое следует добавить для улучшения обусловленности информационной матрицы, должно быть как можно более близким к этому направлению. Если строки матрицы наблюдаемости для избыточных измерений нормированы до модуля единицы, то наиболее близким к направлению максимальной неопределенности будет измерение, для которого скалярное произведение (\bar{h}, \mathbf{v}_1) , соответствующее измерению нормированной строки матрицы наблюдаемости \bar{h} на первый собственный вектор \mathbf{v}_1 , будет максимальным. Такой подход позволяет определить наиболее информативные дополнительные измерения, но не содержит информации для замены одних измерений на другие.

Возможным подходом к замене отдельных РМУ, выбранных по критерию топологической наблюдаемости при решении задач 1–3, может быть установка РМУ в узле, соответствующем направлению максимальной неопределенности вместо РМУ одного из смежных с ним узлов.

Анализ такой возможности, выполненный для семи тестовых схем IEEE для РМУ первого типа, показал, что хотя число вариантов, позволяющих уменьшить след ковариационной матрицы, и невелико, но они существуют. Кроме того, когда нет возможности добавить РМУ в направлении максимальной неопределенности, задаваемым первым собственным вектором при нескольких близких между собой минимальных собственных значениях

улучшение обусловленности может быть достигнуто введением РМУ в узле, соответствующем максимальной компоненте собственного вектора, связанного со следующим собственным значением.

При выборе узлов и связей, в которых предпочтительно установить РМУ при решении задачи 1, может быть полезным предложенный в [1] метод, заключающийся в направленной замене измерений, включенных в исходный базис на этапе построения дерева измерений при анализе топологической наблюдаемости, на другие возможные измерения. В основе этого метода лежит известная в линейном программировании процедура смены базиса, задаваемого в данном случае нормированными строками базисной матрицы. Разложение построчно нормированной матрицы измерений—президентов на ввод в базис H_r по строкам базисной матрицы H_b может быть представлено как

$$H_r = CH_b. \quad (10)$$

Если элемент c_{ij} матрицы разложения C больше единицы, то замена базисного измерения, соответствующего j -й строке H_b , на измерение, соответствующее i -й строке матрицы H_r , приведет к увели-

чению определителя базисной матрицы H_b^* , полученной после смены базиса:

$$\det(H_b^*) = c_{ij} \det(H_b). \quad (11)$$

При одновременной замене нескольких базисных измерений на альтернативные измерения, увеличение определителя базисной матрицы будет кратно произведению коэффициентов разложения, соответствующих таким заменам:

$$c_S = \prod_{k=1,2,\dots} c_k. \quad (12)$$

Одновременная замена измерений особенно важна при формировании базиса на основе РМУ измерений, потому что при замене измеряемых векторов в соответствии с моделью (7) надо одновременно менять активные и реактивные составляющие токов или/и узловых напряжений. Следует отметить также, что процедура выбора оптимального базисного состава измерений из числа измерений, вошедших в РМУ, может быть полезна и для формирования базисной системы измерений в методе контрольных уравнений [11].

Дальнейшее улучшение обусловленности матрицы наблюдаемости может быть получено введением избыточных измерений в направлении макси-

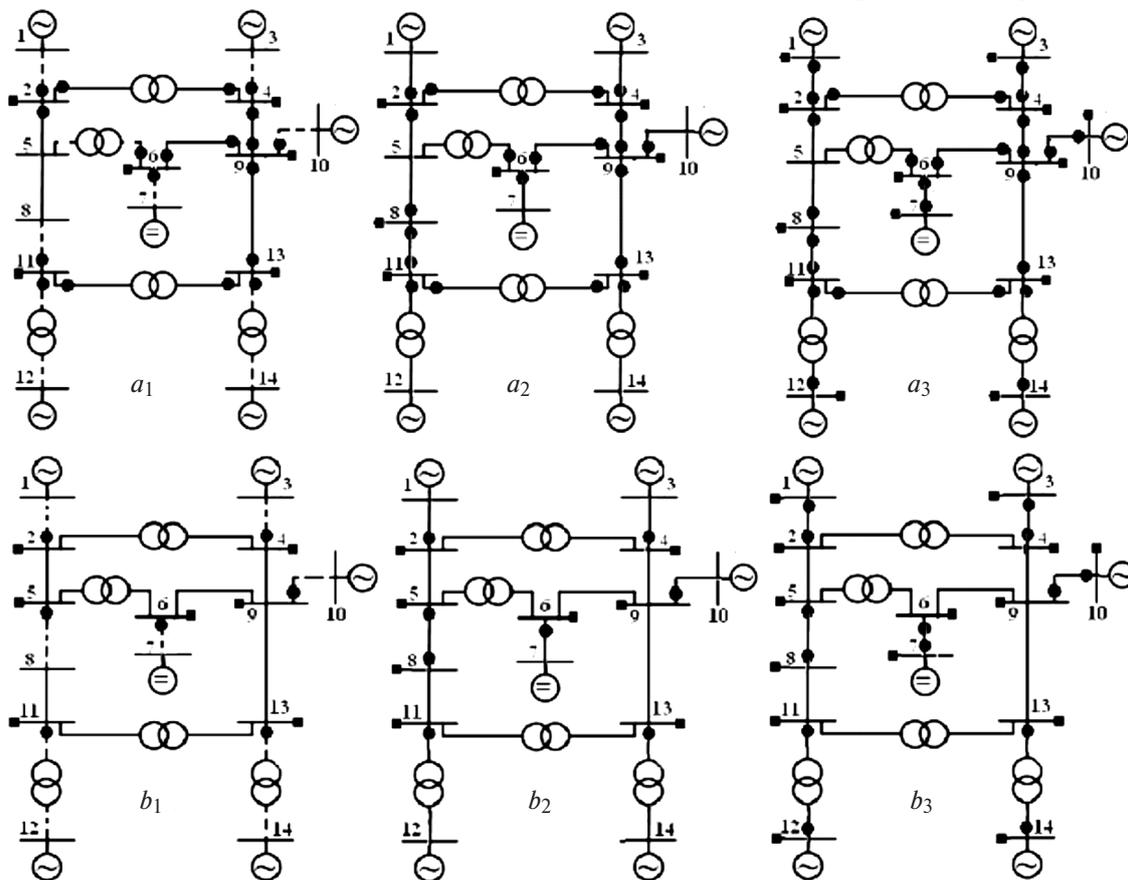


Рис. 3. Расстановка РМУ измерений в узлах (a_1, a_2, a_3) и связях (b_1, b_2, b_3) тестовой сети при решении задач 1–3: (■, ●) — измерения векторов узловых напряжений и токов в связях; - - - - то же подсистем деревьев измерений для (a_1, b_1)

Тип РМУ	Номер задачи	Число			Значение следа ковариационной матрицы	
		измерений суммарное	РМУ	критических измерений	базисный состав	полный состав
В узлах	1	50	6	14	20527	20522
	2	56	7	12		4231,5
	3	80	13	0		139,564
В связях	1	28	7	28	20404	20404
	2	32	8	24		4114,4
	3	56	14	0		23,0755

мальной неопределенности, задаваемом максимальными компонентами первого собственного вектора.

Иллюстрация алгоритмов выбора оптимального состава измерений с учетом качества наблюдаемости на примере тестовой сети. На рис. 3 показаны составы РМУ, полученные при решении задач 1–3 для размещения РМУ в узлах (a_1, a_2, a_3) и в связях (b_1, b_2, b_3). Штриховыми линиями выделены подсистемы деревьев измерений, соответствующие базисным измерениям и имеющие в качестве корневого узла с измеренным вектором напряжения. **Задача 1** решалась при ограничении, запрещающем установку РМУ в висячих узлах. В таблице приведены данные для сравнения двух способов обеспечения наблюдаемости на основе РМУ измерений в задачах 1–3.

Анализ показывает, что состав измерений для задачи 1 при размещении РМУ в узлах является избыточным: наблюдаемость узлов 2, 5, 6, 11 обеспечивается измерениями двух РМУ, узлов 4 и 13 – трех, а узла 9 – четырех РМУ. Особенности топологии сети и запрет на размещение РМУ в висячих узлах не позволяют получить альтернативного решения задачи 1.

Не найдено альтернативных решений и для базисных составов измерений, рис. 3 (a_1, b_1), по-

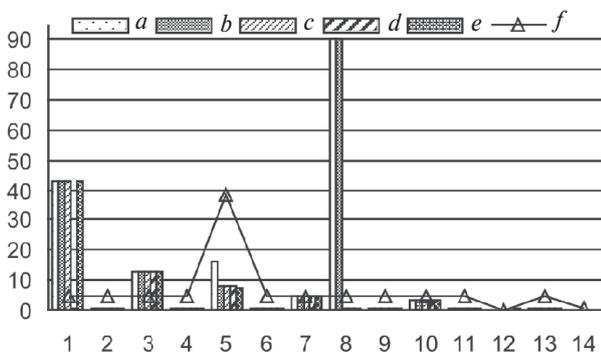


Рис. 4. Дисперсии оценок активных (реактивных) составляющих узловых напряжений: a – полный состав измерений рис. 1 a_1 ; b – базисный состав измерений рис. 1 a_1 ; c, d – введение в базисный состав измерений векторов напряжений в 8 и 1 узлах; e – состав измерений рис. 1 a_2 ; f – состав измерений рис. 1 a_3 (с.к.о. увеличены в 5 раз)

скольку с помощью процедуры смены базиса улучшить обусловленность матрицы наблюдаемости не удалось.

На рис. 4 (a) приведены дисперсии оценок активных (реактивных) составляющих узловых напряжений для состава измерений, соответствующего задаче 1, показывающие, что сенсорными являются узлы 8 и 1. Эти же узлы являются сенсорными и для базисного состава, рис. 4 (b). Как сенсорный 8-й узел выделяет и максимальная компонента собственного вектора информационной матрицы, связанная с ее минимальным собственным значением.

Базисный состав, выбранный из 50 измерений, выполняемых шестью РМУ первого типа, включает шесть измерений векторов напряжений и восемь измерений векторов токов. После добавления к базисному составу измерений векторов напряжений в 8-м, а затем в 1-м узлах [рис. 4 (c) и (d)] происходит снижение дисперсий оценок вектора состояния в этих узлах, увеличение минимального собственного значения информационной матрицы и снижение следа ковариационной матрицы (рис. 5).

Улучшение обусловленности задач 2 и 3 по сравнению с задачей 1, как следует из рис. 4 и 5, достигается за счет большого числа измерений – 56 для задачи 2 и 80 для задачи 3. Тем не менее, значение следа ковариационной матрицы для задачи 2 превышает значение следа ковариационной матрицы базисного состава измерений, усиленного до-

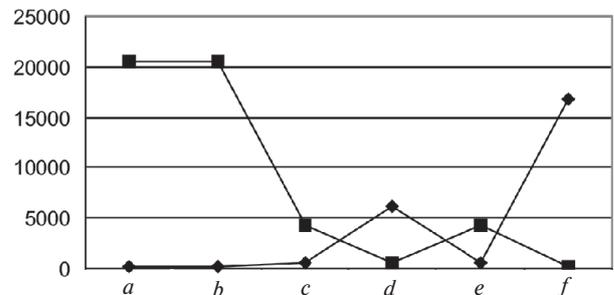


Рис. 5. Минимальное собственное значение (увеличено в 10^6 раз) информационной матрицы (\blacklozenge) и след ковариационной матрицы (\blacksquare); a – полный состав измерений рис. 3 a_1 ; b – базисный состав измерений рис. 3 a_1 ; c, d – введение в базисный состав измерений векторов напряжений в 8 и 1 узлах; e, f – составы измерений рис. 3 a_2 и рис. 1 a_3

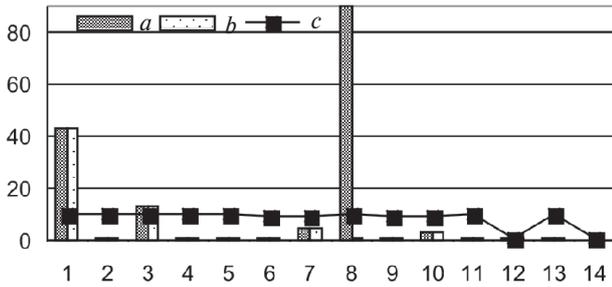


Рис. 6. Дисперсии оценок активных (реактивных) составляющих узловых напряжений: *a* – состав измерений рис. 3 *b*₁; *b* – состав измерений рис. 3 *b*₂; *c* – состав измерений рис. 3 *b*₃ (с.к.о. увеличены в 10 раз)

бавлением измерений двух векторов напряжений в сенсорных узлах.

На рис. 6 для задач 1–3 приведены дисперсии оценок вектора состояния при размещении PMU в связях, показывающие, как улучшает оценки добавление всего одного PMU в сенсорном узле 8.

Проанализируем возможность улучшить точность оценок вектора состояния перестановкой PMU в задаче 1 *a*₁ в сенсорные узлы 8 и 1. Для узла 8 допустимых замен не найдено, а для узла 1, если не учитывать рекомендации не устанавливать PMU в висячих узлах, замена PMU в узле 2 на PMU в узле 1 позволяет уменьшить след информационной матрицы с 20522 до 17178.

Даже простой топологический анализ состава измерений рис. 3 *a*₃ показывает, что для каждого из 13 PMU ошибка любого измерения оказывает влияние как на ошибки оценок остальных измерений этого PMU, так и на ошибки оценок измерений остальных 12 PMU. Таким образом, область взаимного влияния погрешностей измерений охватывает всю сеть.

Аналогичный анализ для состава измерений 14 PMU (рис. 3 *a*₃) показывает, что имеется семь областей взаимного влияния погрешностей измерений, образованных измерениями дублирующих друг друга PMU в связях 1-2, 3-4, 5-8, 6-7, 9-10, 11-12, 13-14.

Заключение об области взаимного влияния погрешностей измерений может быть получено также по исследованию состава ненулевых элементов столбца или строки симметричной ковариационной матрицы ошибок оценок измеренных переменных, связанных с любым из измерений [1]:

$$P_z = H(H^T R_z H)^{-1} H^T. \quad (13)$$

Сравнение результатов, полученных для двух способов размещения PMU в узлах и связях на примере тестовой сети с большим числом висячих связей, представлено диаграммой рис. 7. Анализ результатов, полученных для тестового примера, показывает следующее.

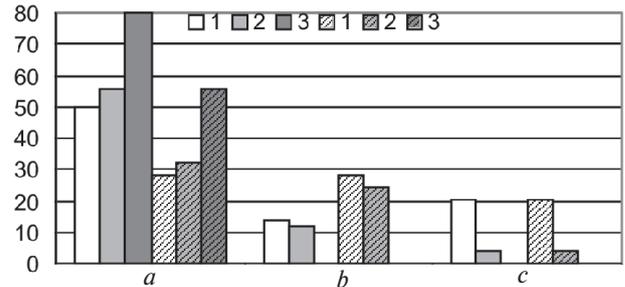


Рис. 7. Результаты сравнения двух способов размещения PMU (диаграммы для второго способа заштрихованы) для задач 1–3: *a* – по суммарному числу измерений; *b* – по числу критических измерений; *c* – по значению следа ковариационной матрицы

1. В задаче 1 для PMU в узлах число избыточных измерений равно 28, при размещении PMU в связях избыточные измерения отсутствуют; число критических измерений в первом способе равно 14, а во втором способе все измерения являются критическими; качество наблюдаемости, оцениваемое следом ковариационной матрицы, для базисного и полного составов измерений в первом способе такое же, как и для базисного состава измерений во втором способе.

2. Задача 2: суммарное число измерений в первом способе равно 56, из которых 32 измерения критические, а во втором способе критическими являются 24 измерения из 32; качество наблюдаемости первого способа, несмотря на большее число измерений, несколько хуже, чем при втором способе;

3. Задача 3: суммарное число измерений в первом способе равно 80, а во втором – 56, критические измерения в обоих случаях отсутствуют; качество наблюдаемости при первом способе хуже, чем при втором; взаимное влияние погрешностей измерений в первом случае распространяется на всю сеть, а во втором ограничено измерениями отдельных связей.

4. В задачах 1–3 минимальное число PMU в узлах на одно меньше, чем число PMU в связях.

Поскольку стоимость системы сбора данных на основе PMU во многом определяется числом коммуникационных каналов, способ размещения PMU в связях представляется более целесообразным и все же оценка реальной стоимости проанализированных вариантов является важнейшим показателем для принятия окончательного решения.

Выводы. 1. Предложенные модификации алгоритмов выбора минимального числа PMU, размещаемых в узлах и связях электрической сети, гарантируют наблюдаемость в нормальных условиях функционирования при отключении отдельных связей и выпадении отдельных PMU.

2. Сравнение двух способов синтеза системы сбора данных на основе PMU, размещаемых в узлах и связях, позволило сделать заключение о практической целесообразности использования второго способа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гамм А.З., Герасимов Л.Н., Голуб И.И., Гришин Ю.А., Колосок И.Н. Оценка состояния в электроэнергетике. — М.: Наука, 1983, 302 с.
2. Гамм А.З., Голуб И.И., Кесельман Д.Я. Наблюдаемость электроэнергетических систем. — Электричество, 1975, № 9, с. 1–7.
3. Гамм А.З., Голуб И.И. Наблюдаемость электроэнергетических систем. — М.: Наука, 1990, 220 с.
4. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах. — М.: Мир, 1981, 333 с.
5. Голуб И.И. Синтез системы информационно-измерительного обеспечения для АСДУ ЭЭС. — Энергетика и транспорт, 1989, № 2, с. 19–27.
6. Golub I.I. Algorithms to ensure reliability of power system observability. — Acta Energetica, 2011, № 3, pp. 14–21.
7. Воропай Н.И., Голуб И.И., Колосок И.Н., Хохлов М.В. Методы оценивания состояния интеллектуальных ЭЭС. — Труды III Международ. научно-технической конф. «Электроэнергетика глазами молодежи». — Екатеринбург: УрФУ, 2012, с. 26–37.
8. Тестовые схемы: http://energy.komisc.ru/dev/test_cases
9. Войгов О.Н., Воропай Н.И., Гамм А.З., Голуб И.И. и др. Анализ неоднородностей электроэнергетических систем. — Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999, 256 с.

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 1, pp 26–33.

Electric Power System Observability Synthesis Algorithms Constructed on the Basis of Phasor Measurements

I.I. GOLUB and M.V. KHOKHLOV

An approach to synthesizing topological observability with the use of phasor measurement units (PMUs) is presented, and it is shown that the topological observability estimation algorithm is common for traditional and PMU-based measurements. Algorithms are proposed for selecting the optimal placement of PMUs according to the observability quality criterion with reference to factors invariant to the power system operating conditions. The use of the proposed versions of algorithms for selecting the minimal number of PMUs placed in the electric network nodes and links guarantee observability of the power system during its normal operation, when some links are disconnected, and when some of the PMUs fail. Some examples of test power systems are considered for making comparison between the observability synthesis algorithms constructed on the basis of PMUs placed in power system nodes and links.

Key words: electric power system, state estimation, topological observability, observability quality, sensors

REFERENCES

1. Gamm A.Z., Gerasimov L.N., Golub I.I., Grishin Yu.A., Kolosok I.N. *Otsenivaniye sostoyaniya v elektroenergetike* (State estimation in electric power engineering). Moscow, Publ. «Nauka», 1983, 302 p.
2. Gamm A.Z., Golub I.I., Kesel'man D.Ya. *Elektrichestvo (Electricity)*, 1975, No. 9, pp. 1–7.
3. Gamm A.Z., Golub I.I. *Noblyudayemost' elektroenergeticheskikh sistem* (Observability of Electric Power Systems). Moscow, Publ. «Nauka», 1990, 220 p.
4. Mainika E. *Algoritmy optimizatsii na setyakh i grafakh* (Optimization algorithms on networks and graphs). Moscow, Publ. «Mir», 1981, 333 p.
5. Golub I.I. *Energetika i transport (Power Engineering and Transport)*, 1989, No. 2, pp. 19–27.
6. Golub I.I. Algorithms to ensure reliability of power system observability. — Acta Energetica, 2011, No. 3, pp. 14–21.
7. Voropai N.I., Golub I.I., Kolosok I.N., Khokhlov M.V. *Methody otsenivaniya sostoyaniya intellektual'nykh EES* (Methods for estimating the state of intellectual electric power systems. In: Proceedings of the International Scientific-Technical Conference «Electric Power Engineering as Seen through the Eyes of Young People»). Ekaterinburg. Ural Federal University, 2012, pp. 26–37.
8. Test: http://energy.komisc.ru/dev/test_cases
9. Voitov O.N., Voropai N.I., Gamm A.Z., Golub I.I. et al. *Analiz neodnorodnosti elektroenergeticheskikh sistem* (An analysis of electric power systems inhomogeneities). Novosibirsk, Publ. «Nauka», 1999, 256 p.
10. Fetzer E.E., Anderson P.M. Observability in the state estimation of power systems. — IEEE Trans. PAS, 1975, No. 6, pp. 1981–1988.
11. Gamm A.Z., Kolosok I.N. *Obnaruzheniye grubyykh oshibok telezmerenii v elektroenergeticheskikh sistemakh* (Detecting gross remote measurement errors in electric power systems). Novosibirsk, Publ. «Nauka», 2000, 152 p.

Authors: Golub Irina Ivanovna (Irkutsk, Russia) — Doctor Techn. Sci., Leading Scientific Researcher in the L.A. Melent'yev Institute of Power Systems, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (RAS).

Khokhlov Mikhail Victorovich (Syktyvkar, Russia) — Cand. Techn. Sci., Head of the Laboratory in the Komi Scientific Centre of Ural Branch RAS.

10. Fetzer E.E., Anderson P.M. Observability in the state estimation of power systems. — IEEE Trans. PAS, 1975, № 6, pp. 1981–1988.

11. Гамм А.З., Колосок И.Н. Обнаружение грубых ошибок телеизмерений в электроэнергетических системах. — Новосибирск: Наука, 2000, 152 с.

[20.05.14]

Авторы: Голуб Ирина Ивановна окончила электроэнергетический факультет Московского энергетического института в 1971 г. В 1994 г. защитила докторскую диссертацию «Анализ и синтез наблюдаемости электроэнергетической системы» в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН. Ведущий научный сотрудник ИСЭМ СО РАН.

Хохлов Михаил Викторович окончил Ухтинский индустриальный институт в 1995 г. В 2010 г. защитил кандидатскую диссертацию «Робастное оценивание состояния электроэнергетических систем на основе неквадратичных критериев» в УГТУ–УПИ. Зав. лабораторией энергетических систем в ИСЭиЭПС Коми НЦ УрО РАН.

