

С.П-2. Методика выбора мест установки РМУ для повышения наблюдаемости энергосистем в задачах оценивания состояния

Д.В. СОРОКИН
ОАО «Северо-Западный Научно-Технический Центр»
Россия
dsorokin@nwec.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Система мониторинга переходных режимов, WAMS, технология синхронизированных векторных измерений, наблюдаемость энергосистем, оценка состояния, генетический алгоритм.

1 ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение надежности функционирования ЕЭС России неразрывно связано с решением задач по планированию и ведению электрических режимов энергосистем. К таким задачам относятся, например, расчеты электрических режимов, оценка допустимости электрических режимов в различных схемно-режимных условиях, оценка уровней устойчивости энергосистем и т.д. Все эти задачи решаются в большинстве случаев на основе применения математических моделей энергосистем. Восстановление параметров электрического режима в моделях энергосистем по данным телемеханической информации (и/или регистраторов СМРР) возможно за счет выполнения оценки состояния энергосистем.

Традиционно оценка состояния энергосистем выполняется на основе применения данных телеметрии и метода наименьших квадратов. Системы телеметрии обеспечивают регистрацию значений режимных параметров и состояния коммутационного оборудования, а также передачу полученной информации в оперативно-информационные комплексы (ОИК) и/или системы SCADA/EMS диспетчерских центров. Существующие системы телеметрии обеспечивают регистрацию телемеханической информации с частотой дискретизации не более 2 с^{-1} . Как правило, объема получаемой из ОИК телеинформации недостаточно для обеспечения полной наблюдаемости энергосистем [1]. Указанный факт свидетельствует о том, что в энергосистемах существуют участки электрической схемы (ненаблюдаемые части энергосистем), электрические параметры которых невозможно определить ни прямым (путем измерений), ни косвенным способом (путем вычисления параметров по законам Кирхгофа). Определение режимных параметров ненаблюдаемых частей энергосистем возможно за счет применения итерационных методов, обеспечивающих минимизацию отклонений режимных параметров оцененного электрического режима от режимных параметров по данным систем телемеханики. Например, такие итерационные алгоритмы реализованы в программно-вычислительных комплексах (ПВК) КОСМОС [2] и СФЕРА [3] (оценка состояния в ПВК СФЕРА реализована за счет применения программных модулей ПВК КОСМОС и RASTRWIN [5]). Кроме того, возможность выполнения оценки состояния заявлена в ПВК RASTR3 [4]. Следует отметить, что в случае применения итерационных процедур (на основе метода наименьших квадратов) пользователю необходимо определить значения весовых коэффициентов, определяющих «наиболее достоверные» и «наименее достоверные» данные телеметрии. Наличие ненаблюдаемых участков энергосистем снижает качество выполняемой оценки состояния энергосистем и тем самым снижает достоверность получаемых в результате оценки состояния электрических режимов. Таким образом, повышение достоверности получаемых в результате оценки состояния электрических режимов может быть выполнено за счет повышения наблюдаемости энергосистем (вплоть до достижения полной наблюдаемости энергосистем).

Такое повышение наблюдаемости может быть обеспечено за счет оценки состояния энергосистем, выполненной по данным регистраторов СМПР.

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Система мониторинга переходных режимов представляет собой систему синхронизированных по времени измерений параметров электрического режима энергосистем во всех пунктах установки соответствующих регистраторов (регистраторов СМПР). Синхронизация измерений выполняется по астрономическому времени на основе применения технологий GPS (или ГЛОНАСС). В большинстве случаев регистраторы СМПР позволяют получить измерения фазных токов по линиям электропередачи, фазных напряжений на шинах станций или подстанций, частоты напряжений, а также перетоков активной и реактивной мощности по линиям электропередачи. В отличие от традиционно применяемых систем телемеханики регистраторы СМПР обеспечивают возможность измерения как модулей, так и углов напряжений (токов). **Указанная особенность СМПР позволяет обеспечить полную наблюдаемость энергосистем за счет установки регистраторов СМПР только в определенных энергоузлах** [6, 7, 8]. В связи с этим, возникает задача определения минимального количества регистраторов СМПР и мест их установки, обеспечивающих полную наблюдаемость энергосистем.

В общем случае задача определения оптимальных в смысле какого-либо критерия мест размещения регистраторов СМПР является комбинаторной и NP полной, что затрудняет решение поставленной задачи методом простого перебора. Например, для поиска минимального количества регистраторов СМПР в 100-узловой схеме энергосистемы необходимо рассмотреть порядка вариантов возможных решений:

$$\sum_{k=1}^{100} {}^{100}_k = \frac{100!}{k!(100-k)!} = 1,3 \cdot 10^{30} \quad (1)$$

Выполнение перебора такого количества вариантов представляет определенную вычислительную сложность. В связи с этим, для определения мест размещения регистраторов СМПР разработаны различные методики и подходы, позволяющие избежать прямого перебора всех возможных вариантов расстановки регистраторов. В частности, известны методики расстановки регистраторов СМПР на основе применения генетического алгоритма [9], алгоритма имитации отжига [7], методов линейного программирования [10], а также на основе определения остовных деревьев графа энергосистем [6]. Кроме того, существуют подходы к решению рассматриваемой задачи на основе сочетания различных методов [8]. Большинство алгоритмов основаны на идее о том, что наличие определенных режимных параметров в одних узлах (ветвях) энергосистемы обеспечивает возможность определения с помощью законов Кирхгофа режимных параметров в других узлах (ветвях) энергосистемы. Кроме того, в отдельные группы можно выделить методику выбора мест установки регистраторов СМПР, основанную на выявлении точек минимального напряжения на линиях электропередачи [12, 13], а также методику, основанную на вычислении коэффициентов чувствительности на каждой итерации расчета электрического режима с помощью метода Ньютона-Рафсона [14].

В настоящей статье представлены результаты выбора мест размещения регистраторов СМПР на примере тестовой 57-узловой схемы энергосистемы [11]. Выявление мест установки регистраторов СМПР выполнено на основе применения генетического алгоритма. В публикации [9] показано, что поставленная задача может быть сформулирована в следующем виде:

$$\begin{cases} \sum_i^n x_i \rightarrow \min, \\ f(X) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

где n – количество узлов в энергосистеме;

$f(X) = 0$ – критерий обеспечения полной наблюдаемости энергосистемы;

x_i – признак установки регистратора СМПР в i -й энергоузел ($x_i = 1$ – регистратор установлен в i -м энергоузле, $x_i = 0$ – регистратор в i -м энергоузле отсутствует);

$\sum_i^n x_i$ – количество устанавливаемых регистраторов СМПР.

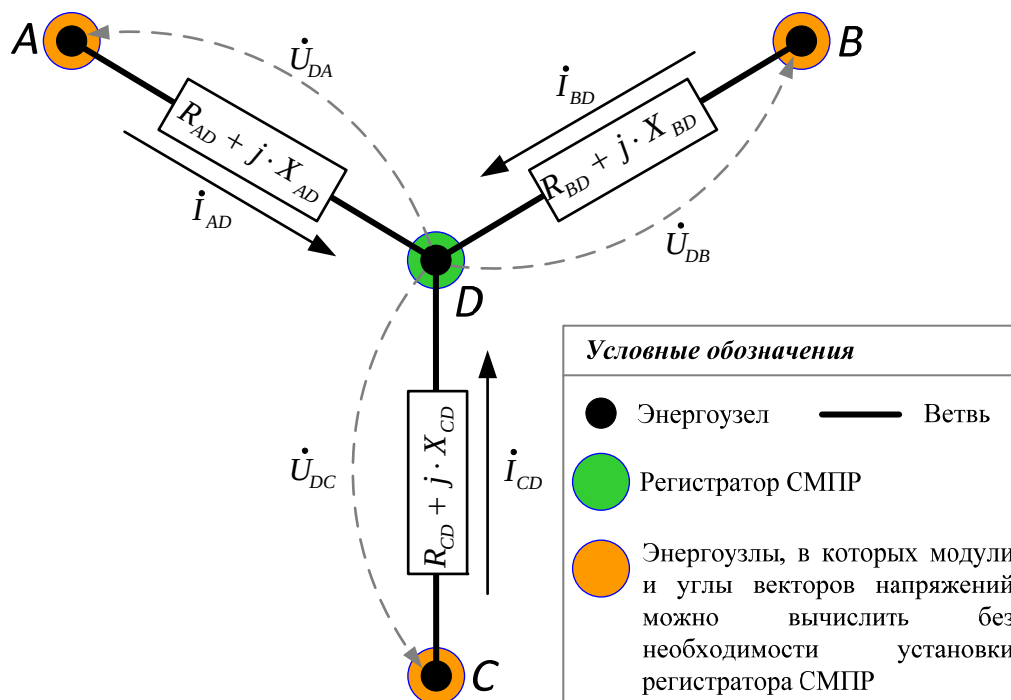


Рис. 1: Иллюстрация одного из «правил наблюдаемости», используемого для обеспечения полной наблюдаемости энергосистемы

Полная наблюдаемость энергосистем при определении энергоузлов установки регистраторов СМПР может быть обеспечена за счет применения различных «правил наблюдаемости». Эти правила могут быть сформулированы на основе применения первого и второго законов Кирхгофа. На рис. 1 представлена иллюстрация одного из «правил наблюдаемости», используемого для обеспечения полной наблюдаемости энергосистемы. В соответствии со вторым законом Кирхгофа для представленной на рис. 1 части схемы энергосистемы верны следующие выражения:

$$\begin{cases} \dot{U}_A = \dot{U}_D - \dot{I}_{AD} \cdot (R_{AD} + j \cdot X_{AD}), \\ \dot{U}_B = \dot{U}_D - \dot{I}_{BD} \cdot (R_{BD} + j \cdot X_{BD}), \\ \dot{U}_C = \dot{U}_D - \dot{I}_{CD} \cdot (R_{CD} + j \cdot X_{CD}). \end{cases} \quad (3)$$

Из системы уравнений (3) следует, что установка регистратора СМПР в один из узлов энергосистемы (в данном случае, в узел D) обеспечивает возможность определения модулей и углов векторов напряжений в смежных узлах (соответственно, в узлах A, B и C). Другие «правила наблюдаемости» представлены в публикации [6]. Применение всех «правил» позволяет формализовать процесс оценки наблюдаемости рассматриваемой схемы энергосистемы при установке регистраторов СМПР в нескольких энергоузлах.

Рассмотренная методика выбора мест установки регистраторов СМПР в энергосистемах реализована автором статьи в программно-вычислительном комплексе (ПВК) «PMU Placement Tool». Входными данными для разработанного программно-вычислительного комплекса являются данные в формате программы расчета установившихся электрических режимов RastrWin [5].

Результаты определения оптимальных мест размещения регистраторов СМПП в тестовой 57-узловой схеме энергосистемы представлены на рис. 3. На рисунке представлен граф схемы рассматриваемой энергосистемы. Ветвям этого графа соответствуют ветви в модели энергосистемы (трансформаторы, автотрансформаторы, линии электропередачи), узлам графа – узлы энергосистемы (подстанции и электростанции). Для повышения наглядности рисунка тупиковые ветви графа (в том числе ветви, соединяющие генераторы с энергосистемой) не показаны. Квадратным маркером на рисунке представлены узлы размещения регистраторов СМПП в энергосистеме. Из рис. 3 видно, что обеспечение полной наблюдаемости в рассматриваемой 57-узловой энергосистеме может быть достигнуто за счет установки регистраторов СМПП всего в 17 (!) узлах этой энергосистемы.

На рис. 4 приведена диаграмма, на которой представлены результаты расчета количества регистраторов СМПП, необходимого для обеспечения полной наблюдаемости энергосистем соответственно в 14-, 30-, 57- и 118-узловых тестовых схемах [11]. Высота столбцов на диаграмме соответствует количеству узлов в соответствующей энергосистеме (в процентах к общему количеству узлов в схеме), в которые необходимо установить регистраторы СМПП для обеспечения полной наблюдаемости этой энергосистемы. Из рис. 4 видно, что несмотря на то, что все рассматриваемые схемы энергосистем имеют различную конфигурацию (структуру сети), количество узлов, в которые необходимо установить регистраторы СМПП для обеспечения полной наблюдаемости энергосистем, составляет величину порядка 30 % от общего количества узлов в энергосистеме.

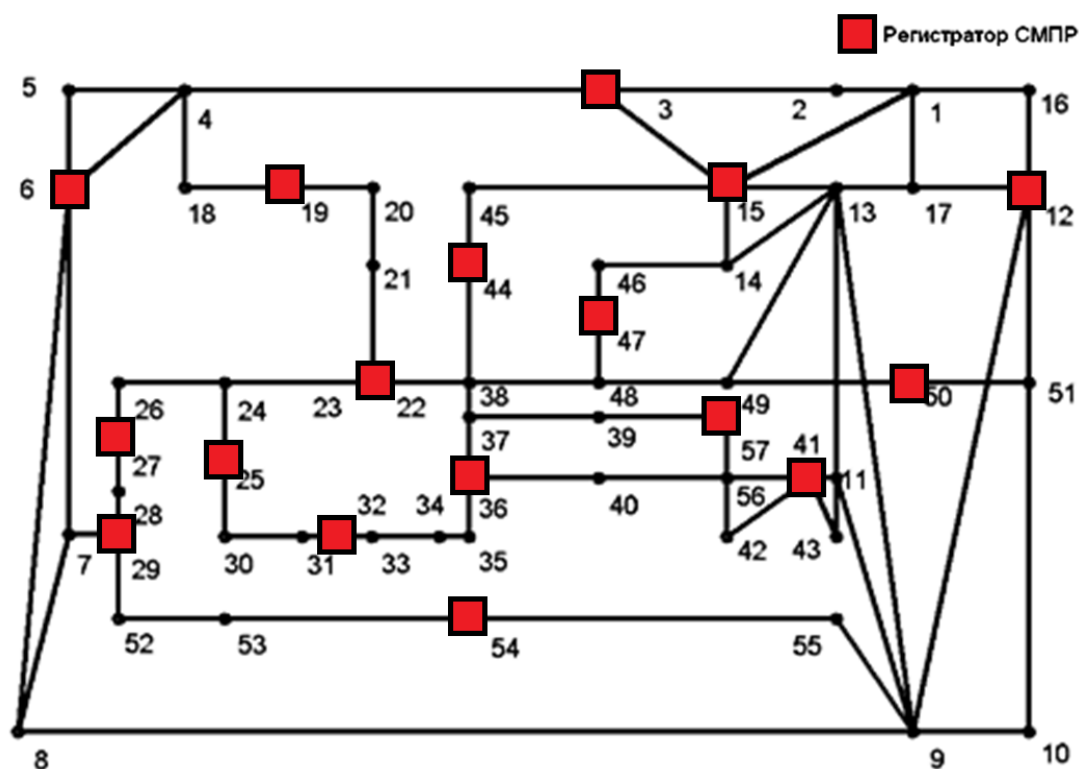


Рис. 3: Граф тестовой 57-узловой схемы энергосистемы

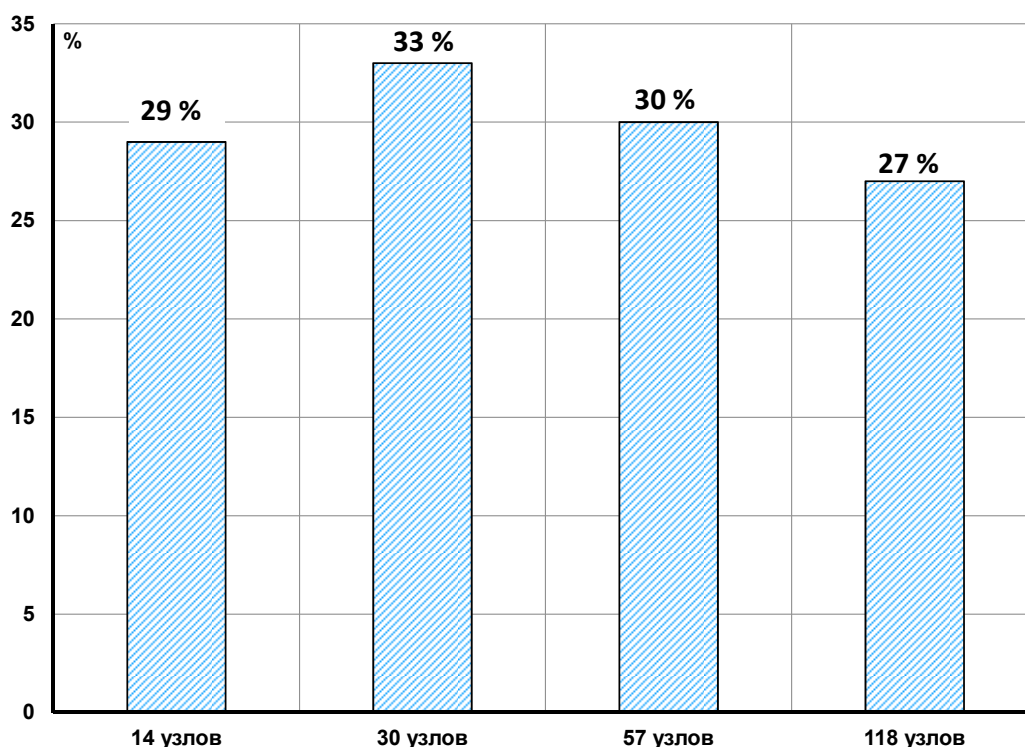


Рис. 4: Зависимость количества регистраторов СМПР, обеспечивающего полную наблюдаемость в энергосистемах, от количества узлов в схеме

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обеспечение полной наблюдаемости энергосистем возможно за счет установки регистраторов СМПР в определенные узлы этих энергосистем. Количество таких энергоузлов значительно меньше общего количества узлов в схеме.

2. Выявление энергоузлов, установка регистраторов СМПР в которые позволяет обеспечить полную наблюдаемость энергосистемы, возможно за счет применения генетического алгоритма.

3. Количество энергоузлов, в которые необходимо установить регистраторы СМПР для обеспечения полной наблюдаемости рассмотренных тестовых схем энергосистем, составляет величину порядка 30 % от общего количества узлов в энергосистеме.

Применение рассмотренных в настоящей статье методов и алгоритмов, а также разработанного автором статьи программно-вычислительного комплекса обеспечивает возможность разработки рекомендаций по выбору мест размещения регистраторов СМПР в ЕЭС России (по критерию обеспечения полной наблюдаемости энергосистем). Разработку таких рекомендаций целесообразно выполнять на основе применения перспективных расчетных моделей энергосистем, актуализация которых выполняется в ОАО «Северо-Западный Научно-Технический Центр» на постоянной основе. **Использование данных регистраторов СМПР в задачах оценки состояния позволит повысить качество и достоверность получаемых в результате оценки состояния электрических режимов, что в свою очередь будет способствовать повышению надежности функционирования ЕЭС России.**

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Глазунова А.М., Колосок И.Н. Методика задания псевдоизмерений для обеспечения наблюдаемости схемы при оценивании состояния ЭЭС. Современные программные средства для расчёта и оценивания состояния режимов электроэнергетических систем. Материалы научно-практического семинара. – Иркутск: ИДУЭС. 2004 г.
- [2] Программа КОСМОС, www.enersys.ru
- [3] Программа СФЕРА, www.monitel.ru/products/sfera/overview.html
- [4] Программа RASTR3, www.rastrwin.ru/rastr/Rastr3.php
- [5] Программа RASTRWIN, www.rastrwin.ru
- [6] Nuqui R.F., Phadke A.G. Phasor Measurement Unit Placement. Techniques for Complete and Incomplete Observability. IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 20, No. 4, Oct. 2005.
- [7] Alessandra B. Antonio, Jose R.A. Torrebo. Meter placement for power system state estimation using simulated annealing. Proc. of the IEEE. Porto Power Tech Conference, 10-13 Sep. 2001.
- [8] Baldwin T.L., Mili L., Boisen M.B., Adapa R. Power System Observability with Minimal Phasor Measurement Placement. IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, No. 2, May 1993.
- [9] Marin F.J., Garcia-Lagos F., Joya G., Sandoval F. Genetic algorithms for optimal placement of phasor measurement units in electrical networks. Electronics Letters, 18 Sept. 2003, №39, PP. 1403 – 1405.
- [10] Gou B. Optimal Placement of PMUs by Integer Linear Programming. This paper appears in: Power Systems, IEEE Transactions on, Issue Date: Aug. 2008, Volume: 23, PP. 1525 – 1526.
- [11] Тестовые схемы энергосистем IEEE, www.energy.komisc.ru
- [12] Курмак В.В. Требования к размещению устройств синхронизированных векторных измерений в энергосистемах РФ. Энергоэксперт, №5, 2011, с. 56 – 58.
- [13] Курмак В.В., Наровлянский В.Г. Метод выявления точек минимального напряжения для определения опасных сечений электроэнергетической системы. Электрические станции, №3, 2011.
- [14] Mueller G., Golub I. PMU Placement Method Based on Decoupled Newton Power Flow and Sensitivity Analysis. 9th International Conference, 2007.