ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Семененко Сергея Игоревича

«Разработка алгоритмов размещения синхронизированных векторных измерений для повышения эффективности оценивания состояния ЭЭС», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

На отзыв представлены:

- диссертационная работа, состоящая из введения, четырех глав с выводами, заключения, библиографического списка из 109 наименований. Полный объем работы составляет 119 страниц;

- автореферат диссертации с общей характеристикой работы, кратким изложением основного содержания и результатов исследования.

Актуальность темы диссертации

Использование синхронизированных векторных измерений для оценивания состояния электроэнергетической системы (ЭЭС) имеет ряд бесспорных преимуществ. В отличие от традиционных измерительных устройств, устройства синхронизированных векторных измерений (PMU) способны предоставлять информацию не только о действующих значениях токов и напряжений, но и их фазовых углах с точной привязкой к астрономическому времени, и, тем самым, обеспечивать существенно более высокое качество оценивания состояния и точность формируемой модели установившегося режима ЭЭС. Кроме того, линейная система уравнений, описывающая зависимости векторных измерений от переменных состояния ЭЭС в прямоугольной системе координат, упрощает и повышает надежность и скорость вычислительных процедур оценивания, что критично для систем диспетчерского управления и, особенно, противоаварийной автоматики.

Однако необходимо принимать во внимание масштаб объекта управления – ЭЭС – и экономические затраты по модернизации существующей информационно-измерительной инфраструктуры, не позволяющие в настоящее время перейти к оцениванию состояния полностью на базе векторных измерений, но предоставляющие возможность повысить эффективность оценивания, выполняемого по традиционным SCADA-измерениям за счет установки PMU на некоторых объектах энергосистемы. Проблема выбора оптимального местоположения векторных измерений в сети для повышения наблюдаемости режима ЭЭС и точности оценивания его параметров является одной из активно разрабатываемых в научной литературе и привлекла за последние 15 лет множество исследователей со всего мира. Это подчеркивает актуальность темы представленного исследования, целью которого является разработка методов и алгоритмов для оптимизации состава PMU, обеспечивающего увеличение точности и скорости оценивания состояния ЭЭС при совместном использовании традиционных и векторных измерений.

Новизна исследований и полученных результатов

Проблема оптимального выбора мест размещения в сети синхронизированных векторных измерений (и измерений вообще) для повышения эффективности оценивания состояния ЭЭС – многокритериальная и за более чем 15 лет своего развития (а с учетом исследований, выполненных при создании существующих измерительных систем в период становления АСДУ ЭЭС – за 40 лет) далеко не исчерпана. В работе следует выделить следующие моменты новизны:

ЭЭС-19/1-459
11.11.19г.

1. Предложен метод и разработан алгоритм выбора мест размещения синхронизированных векторных измерений, при использовании которых совместно со SCADA-измерениями узловых токов (мощностей) вычисление остальных параметров режима сводится к решению треугольной системы уравнений, обеспечивая тем самым супер-ускоренный расчет установившегося режима по данным измерений.

2. Интерес представляет применение неитерационного метода решения нелинейного комплексного уравнения с одним неизвестным напряжением, возникающего при решении треугольной системы уравнений установившегося режима, путем сведения его к квадратичному комплексному уравнению. Аналитическое решение уравнений такого типа открывает возможности по повышению эффективности расчетных процедур, используемых в других задачах анализа режимов ЭЭС.

3. Разработан алгоритм размещения синхронизированных векторных измерений, формирующий локально наблюдаемый по PMU-измерениям «остров» сети (каркас), с целью декомпозиции нелинейной задачи оценивания состояния ЭЭС на линейную подзадачу оценивания «острова» и нелинейную подзадачу оценивания по данным SCADA-измерений параметров режима остальной части ЭЭС, и тем самым, повышения эффективности оценивания состояния ЭЭС.

4. Предложен новый подход к преобразованию исходной нелинейной формулировки задачи оценивания состояния ЭЭС по данным векторных измерений к линейной формулировке путем поворота системы координат действительной и мнимой составляющих комплексных параметров.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы связана с улучшением наблюдаемости ЭЭС за счет повышения быстродействия и точности алгоритмов оценивания состояния при надлежащем выборе состава синхронизированных векторных измерений. Предложенные в работе методы и алгоритмы размещения PMU могут найти применение при проведении технико-экономического обоснования планирования развития информационно-измерительной системы.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Основные положения и выводы достаточно обоснованы и подтверждены вычислительными экспериментами на тестовых и реальных схемах ЭЭС.

Подтверждение опубликованных основных результатов работы

Основные результаты работы изложены в 18 печатных публикациях, 8 из которых опубликованы в рецензируемых изданиях, в том числе индексируемых системой Scopus, неоднократно докладывались на российских и международных научно-технических конференциях. Автореферат диссертации в полной мере отражает содержание диссертации.

Соответствие работы научной специальности

Тематика и содержание исследования соответствуют паспорту научной специальности 05.14.02 - Электрические станции и электроэнергетические системы, а именно пунктам 6 (Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике) и 7 (Разработка методов расчета установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем).

Вопросы и замечания по содержанию диссертационной работе

1. В работе используются термины «оценивание состояния», «оценка состояния» и «достоверизация» как синонимы. Вызывает возражение применение автором термина

«оценивание» к расчету установившегося режима ЭЭС по данным неизбыточного набора измерений. Оценивание подразумевает вычисления статистических оценок параметров режима, что возможно только в условиях избыточной измерительной информации.

2. Супер-ускоренный расчет установившегося режима, представленный в главах 1 и 2, предполагает использование традиционных измерений активных и реактивных мощностей в узлах ЭЭС. В реальных системах измерения узловых мощностей менее распространены, чем измерения перетоков мощности по связям.

3. Отмечая высокую погрешность результатов супер-ускоренного расчета, выявленную в ходе вычислительных экспериментов, автор заключает, что алгоритм может найти применение в результате дальнейшего увеличения точности измерения модуля и угла напряжения. Сомнительно, что можно получить приемлемые результаты расчета режима 1414-узловой ЭЭС, измеряя сколь угодно точно векторы напряжений лишь в каждом десятом узле (табл. 4) и используя измерения мощностей, имеющих погрешность от 2 до 5% , в остальных узлах.

4. Предложенный в главе 3 алгоритм выбора состава векторных измерений основан на анализе топологии сети и направлен на увеличение числа узлов, наблюдаемых по данным PMU в каркасе. При этом следует заметить, что результат работы алгоритма зависит от порядка нумерации узлов сети, вследствие чего, результатом может быть как расстановка, обеспечивающая максимальную точность оценок параметров режима, так и расстановка, малопригодная для получения удовлетворительных оценок. Возможность повышения точности оценивания за счет выбора наилучшей среди них в работе не рассмотрена.

5. Следует пояснить заключение, высказанное автором на стр. 83, что для повышения точности оценивания состояния «при размещении PMU следует учитывать не только топологию сети, но и мощность, протекающую по каждой ветви».

6. При разработке методов размещения PMU автор преследует целью повышение скорости и точности оценивания состояния ЭЭС, упуская из виду проблему достоверизации измерений. Так, на рис. 3.3 и 3.4 векторные измерения токов и напряжений, образующие каркас, являются критическими или относятся к критической паре, недостоверные измерения среди них не идентифицируются. Появление грубой ошибки в одном из измерений приведет к искажению оценок параметров режима всего «острова», а далее - к искажению режима за его пределами с браковкой достоверных SCADA-измерений.

7. Разделение задачи оценивания состояния ЭЭС путем декомпозиции на линейное и нелинейное оценивание приводит к снижению уровня избыточности векторных измерений и, следовательно, статистической эффективности и робастности оценок параметров режима каркаса. Проводились ли автором диссертации численные исследования по обоснованию декомпозиции именно с позиции качества оценивания состояния ЭЭС?

8. Вывод об эффективности предложенного в главе 4 метода линейного оценивания ЭЭС делается по результатам сопоставительных расчетов с традиционным методом, в котором, однако, в качестве весов слагаемых целевой функции используются величины, обратные квадрату относительной погрешности измерений, что, никак не обосновано. Расчеты, выполненные оппонентом, с использованием традиционных весовых коэффициентов, обратных дисперсиям мнимых и действительных компонент, которые вычисляются методом частных производных для известных дисперсий модулей и углов, показывают, что результаты оценивания обоими методами статистически неразличимы.

Вывод о более высокой точности предложенного метода не подтверждается, что не отменяет его новизны и, возможно, иных преимуществ перед традиционным методом.

9. Учитывая большое количество работ по теме оптимального размещения синхронизированных векторных измерений, было бы полезным высветить преимущества предлагаемых автором решений путем сравнения с решениями, полученными другими исследователями. Сопоставление, представленное в табл. 3 главы 1, делается лишь по числу PMU, размещаемых для обеспечения наблюдаемости ЭЭС, но не с точки зрения достигаемой эффективности оценивания состояния ЭЭС. При этом корректность сопоставления вызывает сомнения, поскольку для сравнения используются решения, представленные в работах по расстановке многоканальных PMU для выполнения оценивания состояния без учета SCADA-измерений.

10. Математические записи грешат некоторыми редакционными неточностями (формулы 1.5, 1.8, 1.11, 4.18, 4.20), затрудняющими воспроизведение результатов.

Заключение

В целом представленную диссертационную работу С.И. Семененко можно считать самостоятельной законченной научно-квалификационной работой, обладающей признаками актуальности, новизны и практической значимости, в которой на основании выполненных автором исследований предложено решение задачи размещения синхронизированных векторных измерений для повышения эффективности оценивания состояния ЭЭС.

По содержанию и по форме работа соответствует требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а ее автор Семененко Сергей Игоревич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 - Электрические станции и электроэнергетические системы.

Официальный оппонент, к.т.н., доцент,
заведующий лабораторией энергетических систем
Института социально-экономических и энергетических
проблем Севера Коми НЦ УрО РАН
ФИЦ «Коми НЦ УрО РАН»
Хохлов Михаил Викторович
6 ноября 2019 г.

Полное наименование организации:
Институт социально-экономических и энергетических проблем Севера Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук»
Юридический адрес:
167982, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 26
Тел.: (8212) 44-50-37
E-mail: hohlov@energy.komisc.ru

Подпись М.В. Хохлова заверяю

Подпись Хохлова М.В.
заверяю.
Ведущая канцелярией Института социально-экономических и энергетических проблем Севера Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (ИСЭ и ЭПС ФИЦ Коми НЦ УрО РАН)
«06» ноября 2019 г.