

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»
«Академия электротехнических наук Чувашской Республики»

**ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
ЭНЕРГЕТИКИ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ
И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ**

**Материалы
III Международной научно-технической
конференции**

Чебоксары
2019

УДК 621.3(06)
ББК 31я43
П78

Редакционная коллегия:

В.Г. Ковалев, канд. техн. наук, профессор (гл. редактор);
Г.С. Нудельман, канд. техн. наук, профессор;
В.А. Щедрин, канд. техн. наук, профессор (зам. гл. редактора);
В.В. Афанасьев, д-р техн. наук, профессор;
Ю.М. Миронов, д-р техн. наук, профессор;
Г.П. Свинцов, д-р техн. наук, профессор;
А.А. Ильин, канд. техн. наук, доцент;
О.А. Онисова, канд. техн. наук, доцент

*Печатается по решению Научно-технического совета
Чувашского государственного университета*

П78 Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – 618 с.

ISBN 978-5-7677-2998-2

Представлены статьи и доклады третьей Международной научно-технической конференции, проведенной совместно с «Академией электротехнических наук Чувашской Республики», в которых приводятся и обсуждаются результаты актуальных научных исследований в области энергетики, электротехники и энергоэффективности, а также рассматриваются вопросы подготовки инженерных кадров.

Для преподавателей, аспирантов, магистрантов, студентов старших курсов энергетических специальностей вузов, инженерно-технического персонала предприятий и энергосистем.

ISBN 978-5-7677-2998-2

УДК 621.3(06)
ББК 31я43

© Издательство
Чувашского университета, 2019

ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ЦИФРОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПРИ ПОТЕРЕ НАБЛЮДАЕМОСТИ

Андреева Е.А., Марков Н.Ю., Солдатов А.В., Антонов В.И.,
ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия.

Аннотация. В докладе рассматривается способ оценивания параметров режима электрической сети в условиях дефицита информации.

Ключевые слова: цифровая электрическая сеть, оценивание состояния электрической сети, наблюдаемость, эквивалентирование.

Введение

В настоящее время развитие распределительных сетей напряжением 6-35 кВ и электроэнергетики в целом идет по пути создания и внедрения технологии «умная сеть» (Smart Grid), получившей в нашей стране название «цифровая электрическая сеть» (ЦЭС) [1, 2].

ЦЭС предполагает наличие центров управления сетями (ЦУС), которые должны быть оснащены программно-техническими комплексами (ПТК), реализованными на базе современных информационных технологий. Основными задачами ПТК ЦУС являются: непрерывный мониторинг за состоянием электрической сети, поддержание текущих параметров режима (ПР: модули напряжений в узлах, активная и реактивная мощности нагрузок и генерации в узлах, потоки активных и реактивных мощностей в ветвях) электрической сети в допустимых пределах, обеспечение надежной работы электрической сети, бесперебойное и качественное электроснабжение потребителей, выполнение расчетно-аналитических функций поддержки принятия решений. Для решения этих задач необходима информация об оборудовании и топологии сети и телеинформация о текущих ПР (телеизмерений) и о положении коммутационных аппаратов (телесигналов), поступающая в ЦУС от информационно-измерительной инфраструктуры (ИИИ). Телеинформация может содержать ошибки измерения [3, 4] и недостоверные данные, которые могут стать причиной принятия неверного решения. Для повышения качества решения задач ИЭС использу-

ются оценки ПР и положений коммутационных аппаратов, которые получают путем оценивания состояния (ОС) электрической сети. В результате ОС выполняется достоверизация телеинформации (минимизируются ошибки телеизмерений и исключаются топологические ошибки) и расчет неизвестных ПР [5]. Совокупность достоверизированных телеизмерений и расчетных ПР называется оценками ПР.

Препятствием для выполнения ОС электрической сети является дефицит измерений, который может возникнуть в результате потери наблюдаемости электрической сети. Под наблюдаемостью понимают свойство электрической сети предоставлять информацию о текущих измеренных ПР [6].

Минимально необходимый для ОС состав измерений, называется базисным. Базисный состав измерений должен формироваться на этапе проектирования ЦЭС и зависит от числа ветвей в схеме сети. Потеря измерения из базисного состава в результате сбора и передачи информации приводит к невозможности выполнения ОС.

Высокая возможность получения оценок ПР гарантируется при избыточной наблюдаемости, когда текущий состав измерений больше базисного. Однако обеспечение избыточности измерений требует больших экономических затрат на организацию развитой ИИИ.

Для минимизации затрат и гарантированного решения задач ЦЭС ИИИ должна строиться с учетом минимизации количества единиц оборудования, осуществляющего сбор телеинформации об объекте, при максимизации видов собираемой информации.

В результате сбоев в ИИИ наблюдаемость электрической сети может быть потеряна, что приведет к появлению ненаблюдаемых участков и невозможности выполнения ОС. Поэтому перед выполнением ОС электрическую сеть всегда необходимо проверять на наличие базисного состава измерений.

В докладе рассматривается способ выполнения ОС при потере наблюдаемости, согласно которому последовательно выявляют ненаблюдаемые участки, эквивалентируют электрическую сеть и выполняют ОС для эквивалентной схемы.

Анализ возможности выполнения ОС основан на теории графов и уравнений узловых балансов мощности и требует выполнения следующих действий:

1) Проверка необходимого условия для выполнения ОС:

$$K \geq M,$$

где K – количество измерений, M – количество ветвей в сети;

2) Составление системы уравнений узловых балансов мощности

$$A \cdot S_{\text{вет}} = S_{\text{узл}}, \quad (1)$$

где A – матрица инцидентий, определяемая топологией сети; $S_{\text{узл}}$ – матрица столбец комплексных мощностей нагрузок и генераций в узлах, $S_{\text{вет}}$ – матрица столбец потоков комплексных мощностей в ветвях между узлами;

3) Преобразование системы уравнений (1), путем переноса в правую часть всех измеренных параметров $\underline{S}_{\text{изм}}$, а в левую часть всех неизмеренных $\underline{S}_{\text{неизм}}$

$$A' \cdot S_{\text{неизм}} = S_{\text{изм}}, \quad (2)$$

где A' – матрица инцидентий, образованная на основе матрицы A , после переноса неизмеренных и измеренных переменных соответственно в левую и правую части уравнений узловых балансов мощности;

4) Проверка достаточного условия для выполнения ОС:

$$\text{rang}(A') \geq E, \quad (3)$$

где $E = (N + M) - K$ – количество неизвестных потоков мощности, N – количество узлов в сети.

Если условие (3) не выполняется, то выполнение ОС невозможно. В этом случае схему электрической сети необходимо преобразовать к такому виду, чтобы она не имела ненаблюдаемых участков. Сделать это можно с помощью эквивалентирования, с предварительным выявлением ненаблюдаемых участков.

Ненаблюдаемые участки сети можно выявить используя уравнения узловых балансов мощности и расстановки для элементов схемы меток наблюдаемости:

1. На первом этапе метки наблюдаемости устанавливаются для измеренных ПР;

2. На втором этапе определяются уравнения, в которых метки наблюдаемости имеются у всех параметров кроме одного. Значение этого параметра может быть найдено и он помечается как расчетный;

3. Повторение п.2 до тех пор, пока все параметры не получат меток или прекратится появление новых меток.

Участки сети, которым соответствуют параметры не получившие меток, являются ненаблюдаемыми.

К эквивалентной схеме электрической сети можно применить любые методы ОС электрической сети. Эквивалентирование ненаблюдаемых участков не ухудшает точность решения задачи ОС, так как не вносит в систему уравнений дополнительных параметров, которые могут содержать погрешности.

Эквивалентирование схемы электрической сети осуществляется по следующим формулам:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{NN} & Y_{MN} \\ Y_{NM} & Y_{MM} \end{bmatrix},$$

$$Y_{\text{ЭКВ}} = Y_{NN} - Y_{NM} \cdot Y_{MM}^{-1} \cdot Y_{MN},$$

$$J_{\text{ЭКВ}} = J_N - Y_{NM} \cdot Y_{MM}^{-1} \cdot J_M,$$

$$U_{\text{ЭКВ}} = Y_{\text{ЭКВ}}^{-1} \cdot J_{\text{ЭКВ}},$$

где Y_{NN} – матрица проводимостей элементов сохраняемой части схемы, матрица проводимостей элементов исключаемой части схемы, Y_{NM} и Y_{MN} – матрицы проводимостей между элементами сохраняемой и исключаемой частями схемы, J_N – матрица столбец задающих токов в сохраняемых узлах схемы, J_M – матрица столбец задающих токов в исключаемых узлах схемы.

Пример

Проведем анализ возможности выполнения ОС для электрической сети, представленной на рис. 1, а, при потере измерений \underline{S}_{23} , \underline{S}_{34} , \underline{S}_{45} и \underline{S}_{52} . В данном случае $E = (6+7) - 8 = 5$, а $\text{rang}(A') = 4$. Поскольку условие (3) не выполняется, то ОС становится невозможным. Используя описанный выше алгоритм поиска ненаблюдаемых участков сети, получим, что ненаблю-

даемыми элементами схемы являются ветви 2-3, 2-5, 3-4, 4-5. После эквивалентирования участка, содержащего ненаблюдаемые элементы, схема сети принимает вид, изображенный на рис. 1, б. Для новой схемы сети условие (3) выполняется и возможно выполнение ОС.

Если в результате ОС выявится, что «эквивалентное» измерение достоверно, то измерения $\underline{S}_2, \underline{S}_3, \underline{S}_4, \underline{S}_5$ признаются достоверными. Однако если «эквивалентное» измерение окажется недостоверным, то определить какое из измерений $\underline{S}_2, \underline{S}_3, \underline{S}_4, \underline{S}_5$ является неверным невозможно. Это является недостатком данного способа.

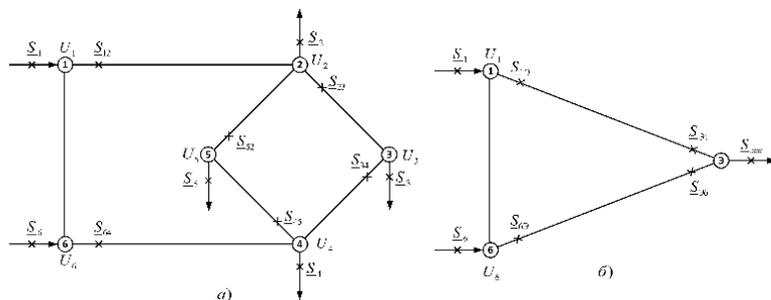


Рис. 1. Схема электрической сети:
а – наблюдаемой; б – съэквивалентированной

Комплекс программ по ОС электрической сети, включающий в себя анализ текущей наблюдаемости сети, эквивалентирование участков сети, оценивание ПР, является необходимым звеном в решении задач ЦЭС и должен включаться в программные комплексы по расчету и анализу режимов [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СТО 34.01-21-005-2019. Стандарт организации ПАО «Россети». Цифровая электрическая сеть. Требования к проектированию цифровых распределительных электрических сетей 0,4-220 кВ. (утв. и введен в действие приказом ПАО «Россети» от 29.03.2019 №64).
2. Антонов В.И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и ее приложения в интеллектуальной электроэнергетике / В.И. Антонов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 2018. – 334 с.

3. Антонов, В.И. Общие начала теории фильтров ортогональных составляющих / В.И. Антонов [и др.] // Релейная защита и автоматизация – научно-практическое издание, 2016. – №1(22). – С. 17-26.

4. Antonov, V.I. Adaptive structural analysis of input signals of digital and relay protection and automation / V.I. Antonov, V.A. Naumov, A.I. Fomin, and A.V. Soldatov // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86(7). – P. 391–397. – ISSN 1068-3712. – DOI: 10.3103/S1068371215070032.

5. Андреева Е.А., Солдатов А.В., Наумов В.А., Марков Н.Ю. Достоверизация параметров режима в системах управления цифровой сети. // Сборник докладов научно-технической конференции молодых специалистов. Чебоксары, 23-26 апреля, 2019.

6. Гамм А.З., Голуб И.И. Наблюдаемость электроэнергетических систем. М.: Наука, 1990. – 200 с.

7. Солдатов А.В., Наумов В.А., Сергеев Н.С., Марков Н.Ю. Веб-сервис анализа и расчета режимов для автоматической системы управления активно-адаптивной сетью. – М.: Оперативное управление в электроэнергетике №5, 2018. – С.19.

Авторы:

Андреева Елена Андреевна, инженер департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», магистрант ЧГУ им. И.Н. Ульянова по направлению «Электроэнергетические системы, сети, электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность». Окончила в 2018 г. факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получила степень бакалавра по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». E-mail: andreeva_ea@ekra.ru.

Марков Николай Юрьевич, специалист по разработке алгоритмов расчета режимов департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», ассистент кафедры ЭИЭС им. А.А. Федорова ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Получил степень бакалавра по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» в 2016 г. Получил степень магистра по направлению «Автоматика энергосистем» в 2018 г на кафедре ТООЭ и РЗА факультета энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: markov_ny@ekra.ru.

Солдатов Александр Вячеславович, заместитель директора департамента автоматизации энергосистем по научному сопровождению продукции ООО НПП «ЭКРА», старший преподаватель кафедры ЭИЭС имени А.А. Федорова ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Получил диплом

инженера на электроэнергетическом факультете ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 2006 г. E-mail: soldatov_av@ekra.ru.

Антонов Владислав Иванович, профессор кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики ЧГУ им. И.Н. Ульянова, главный специалист департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». Получил диплом инженера-электрика в 1978 г. на факультете электрификации и автоматизации промышленности ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 2018 г. защитил докторскую диссертацию «Теория и приложения адаптивного структурного анализа сигналов в интеллектуальной электроэнергетике» в ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: antonov_vi@ekra.ru.

ОЦЕНИВАНИЕ РАСПОЗНАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ ЧИСЛА ЗАМЕРОВ

Кочетов И.Д., Лямец Ю.Я., Маслов А.Н., ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия.

Мартынов М.В., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** Рассматривается оценивание распознающей способности измерительных органов защиты дальнего резервирования в ситуации, когда α -режим – трехфазное КЗ в ответвлении, а β -режимы – подключение линии к сети.*

***Ключевые слова:** релейная защита, распознающая способность, измерительные органы.*

Релейная защита, иначе наблюдатель, имеет в своём арсенале не только априорную информацию об объекте, но и текущие значения наблюдаемых величин. С позиций релейной защиты наблюдаемые режимы энергообъекта можно разделить на отслеживаемые (контролируемые) α -режимы, на которые она должна реагировать, и на альтернативные β -режимы, на которые реагировать не должна. Информационный приоритет β -режимов обусловлен требованием селективности релейной защиты, играющем главную роль в ограничении распознающей способности наблюдателя.