

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, старшего научного сотрудника Чукреева Юрия Яковлевича на диссертационную работу
Абдель Менаэм Амир Салах Хассан, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы» на тему: «Improving evaluation methods of adequacy for renewable energy integrated power systems» («Развитие методов оценки показателей балансовой надежности энергосистем с возобновляемыми источниками энергии»), представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

1. Актуальность темы

Доля возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ) во всем мире неуклонно растет. Это можно сказать и о нашей стране, хотя она сегодня составляет не более двух процентов в общем балансе производства электроэнергии. К 2030 г. эта доля должна увеличиться до 10-11 %. В некоторых странах западной Европы этот показатель достигает 30 и более процентов. Совершенно очевидно, что ВИЭ привносят в управление энергосистемой, как при эксплуатации, так и при планировании развития новые проблемные вопросы, связанные с неопределенностью энергоемкости энергоносителей (ветер, солнце). Особенно это проявляется в вопросах обеспечения балансовой надежности электроэнергетических систем.

В современных условиях, как в нашей стране, так и за рубежом основными методами для решения задачи оценки показателей балансовой надежности (ПБН) являются методы, основанные на многократном формировании случайных состояний генерирующего и сетевого оборудования, вызванные выводом его в плановые и аварийные ремонты. Посредством такого моделирования определяются показатели балансовой надежности, которые сравниваются с нормативными и делается определенные управляющие воздействия на обоснование средств обеспечения балансовой надежности – резервы мощности и усиление системообразующих связей. Диссертационное исследование Абдель Менаэм А.С.Х. направлено на повышение точности оценки показателей балансовой надежности, получаемых методами статистических испытаний за счет идентификации редких, с вероятностью появления менее 10^{-4} . С этой целью в работе предложен ряд расчетных процедур основанных на методах вложенных подпространств и кросс-энтропийных методах. Для расчета узловых (вероятность дефицита мощности) и сетевых (вероятности перегрузки межсистемной связи) показателей надежности в работе предложен ряд аналитических процедур, основанных на методах точечной оценки вероятностных характеристик модели-

руемых случайных величин. С учетом изложенного актуальность работы не вызывает сомнения.

2. Структура и объем диссертации

Представленная на английском языке диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и библиографического списка из 140 наименований. Содержит 110 страниц, 19 рисунков и 10 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, поставлены цели и задачи диссертационной работы.

В первой главе достаточно полно представлен информационно-аналитический обзор, позволяющий оценить текущее состояние проблемы оценки ПБН ЭЭС, в том числе и распределительных электрических сетей с наличием ВИЭ. Данна постановка задачи оценки ПБН ЭЭС. Описаны основные математические методы, получившие широкое применение при ее решении. Показано, что основным математически методом является метод статистических испытаний Монте-Карло (ММК). Отмечается, что погрешность оценки ПБН, получаемых данным методом, имеет связь с числом моделируемых событий. Отсюда при их малой вероятности для обеспечения требуемой точности необходимо моделирование чрезвычайно большого числа случайных состояний.

Во второй главе приводятся возможные для решения поставленной задачи аналитические методы, рассматриваемые как альтернатива ММК. Предлагаемые аналитические методы предполагают оперирование с эквивалентными функциями распределения вероятностей не только исходных (нагрузка, расположенная генерация), но и функционально зависимых от исходных промежуточных (сетевые потоки мощности и др.) случайных величин. При сравнении аналитических методов в качестве основного объекта анализа рассматривается концентрированная ЭЭС.

Для описания вероятностных свойств системы предлагается использовать комбинирование метода кумулянтов с разложением Грама-Шарлье или фон Мизеса. Основная цель использования метода кумулянтов - избежать сложную свертку функций распределения (ФР) входных переменных и заменить ее простой арифметической операцией сложения кумулянтов (семиинвариантов). При этом, в случае свертки групп однотипных генераторов особенно полезно аддитивное свойство кумулянтов. Объединение систем «генерация-нагрузка» реализуется суммированием их коммулянтов. Используя метод Грама-Шарлье, путем аппроксимации в общем случае произвольной расчетной функции НР, формируется ФР дефицита мощности. Показано, что наиболее точным методом оценки вероятностных параметров ограничения нагрузки является метод свертки при раздельном учете генерации и нагрузки. Метод комбинирования кумулянтов, ряда Грама-Шарлье и функции фон Мизеса значительно превосходит другие аналитические методы по точности решения. Для практического использования

рекомендуется метод фон Мизеса, как достаточно точный и более простой с математической точки зрения.

Большое внимание в диссертационной работе уделено методам точечной оценки вероятностей моделируемых событий. Предлагается оригинальная модификация метода Хонга $M(2n+1)$, где дополнительно к классическим, описанным в литературных источниках множествам анализируемых событий предлагаются включить блок событий, связанных с двойным наложением значимых событий. Это существенно повышает точность расчетов.

Третья глава посвящена выявлению наиболее значимых с позиций оценки балансовой надежности событий. Показано, что они связаны с кратными одновременными отказами в период максимальной нагрузки двух ЛЭП, или ЛЭП и наиболее мощного генератора. Это соответствует действительности, т.к. ЭЭС проектируются под выполнение критерия N-1. Кратные отказы имеют чрезвычайно малую вероятность (при вероятности отказа одной ЛЭП $q = 10^{-3}$ вероятность одновременного отказа двух ЛЭП $q = 10^{-6}$). При этом для представительной идентификации такого события ММК требуется не менее 10^8 испытаний, что приводит к практической нецелесообразности использования ММК из-за недопустимо большой длительности расчетов. Требуется модификация классического ММК с целью исключения из расчетов незначимых событий. Именно этому посвящена третья глава диссертации.

Использование выборки по значимости (ВпЗ) является эффективным механизмом снижения дисперсии результирующих показателей в ММК. ВпЗ позволяет выделить ту область значимых событий, в которой события, приводящие к ограничению нагрузки, имеют большие вероятности возникновения, чем в исходных распределениях. Однако формирование множества значимых событий на основе теоретически идеальной плотности выборки по значимости» (ПВпЗ), позволяющее достичь нулевую дисперсию при идентификации редких событий, является непростой задачей. Здесь требуется a priori знать области потенциальных отказов. Для аппроксимации оптимальной ПВпЗ применён кросс-энтропийный метод (КЭМ).

В диссертационной работе рассматривается КЭМ с двумя модификациями: дискретной (классический КЭМ) и адаптивной (модифицированный КЭМ (МКЭМ)) индикаторной функцией. Процесс расчета по схеме классического КЭМ включает в себя два этапа. На первом идентифицируются ПВпЗ узловых нагрузок и генераций. На втором этапе, полученные ПВпЗ, используются для сэмплирования состояний узловых генераций и нагрузок и рассчитываются ПБН ЭЭС.

Основной научной новизной диссертационной работы является описанная в этой модификации КЭМ, заключающаяся в том, что классическая критериальная сигмоидальная функция с дискретным изменением уровней, заменяется

кривой нормального распределения с варьируемыми математическим ожиданием и дисперсией. Авторство предлагаемого метода подтверждается публикацией в журнале Mathematics квотиля Q1. В работе показано, что основным преимуществом данного метода является его более надежная мягкая сходимость. Сопоставительные расчеты позволяют считать предлагаемый метод предпочтительным для практических расчетов.

Четвертая глава включает в себя решение вопросов учета ВИЭ при оценке ПБН. Рассмотрены вопросы согласования при моделировании генерирующей мощности ВИЭ и мощности электроприемников. Предложено проводить оценку ПБН ЭЭС со значительной долей ветровых и солнечных электростанций предложенным в третьей главе модифицированным кросс-энтропийным методом (МКЭМ).

Показано, что для учета ВИЭ при расчете ПБН сложной системы, в первую очередь, необходимо адаптировать стохастическую модель таким образом, чтобы она позволила максимально точно отобразить все статистические характеристики энергоносителей (скорости ветра, солнечного излучения, температуры) и согласовать их с реальными наблюдениями нагрузок. Фактор времени учитывается при анализе суточных графиков нагрузки и их согласованием с вероятностными характеристиками возобновляемых энергоносителей.

К работе прилагается официально разосланный в установленные сроки автореферат диссертации на 24 страницах.

3. Степень обоснованности и достоверности научных выводов, положений и рекомендаций

Достоверность и обоснованность сделанных в диссертационной работе научных выводов и рекомендаций достаточно убедительно подтверждена использованием системного подхода, а также методов теории электроэнергетических систем. Корректность и эффективность разработанных моделей и методов оценивалась проведением численных экспериментов на тестовых и реальных схемах и подтверждена непротиворечивостью полученных результатов и теоретических выводов, во многом совпадающих с решениями, применяемыми в практике. Полученные по авторской методике значения ПБН корреспондируют с результатами статистического анализа событий, связанных с дефицитом мощности реальных ЭЭС. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации, отвечает требованиям, предъявляемым к научным квалификационным работам.

4. Новизна научных результатов

Представленные ниже положения, отмеченные в автореферате можно характеризовать как научную новизну диссертационного исследования:

1. Разработан алгоритм формирования выборки по важности анализируемых событий, основанный на применении модифицированного кросс-

энтропийного метода. В его основу положено адаптивное изменение параметров критериальной функции, обеспечивающее более высокую сходимость итерационного процесса выделения множества редких событий. Мягкая адаптация параметров позволяет более полно учесть дефицитные состояния ЭЭС, связанные с частичным ограничением электропотребления. Все это в совокупности значительно повышает эффективность выборки и улучшения сходимости.

2. Для повышения эффективности выборки коррелированной вероятностной модели ВИЭ и спроса предложено и обосновано комбинированное использование модифицированного кросс-энтропийного метода и многомерной Гауссовой смеси.

5. Практическая значимость работы

Работа ориентирована для решения основных технических проблем, вызванных внедрением в энергосистеме Египта распределённой генерации на базе ВИЭ. Предложенные математические методы и процедуры могут быть использованы при разработке программных комплексов оценки ПБН реальных ЭЭС с возобновляемыми источниками энергии.

6. Апробация работы и подтверждение опубликования основных положений работы

Результаты исследований апробированы участием автора на 4 международных и всероссийских научно-практических конференциях (2018-2020 гг.). По результатам исследования опубликовано 7 научных работ, из них 2 статьи опубликованы в рецензируемых научных изданиях, определённых ВАК и Аттестационным советом УрФУ. 5 статей опубликованы в зарубежных изданиях, входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

7. Соответствие диссертации критериям «Положения о присуждении учёных степеней»

Диссертационная работа Абдель Менаэм Амир Салах Хассан на тему: «Improving evaluation methods of adequacy for renewable energy integrated power systems» («Развитие методов оценки показателей балансовой надежности энергосистем с возобновляемыми источниками энергии») в полном объёме отвечает критериям, которые указаны в п. 9-14 Положения о присуждении учёных степеней в УрФУ.

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой автором предложено новое научно обоснованное техническое решение в виде разработанных моделей и методов расчёта показателей балансовой надежности ЭЭС в локальных электрических системах с ВИЭ.

Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, что свидетельствует о личном вкладе автора диссера-

ции в науку. В диссертации имеются сведения о практической полезности результатов и рекомендации по использованию научных выводов. Полученные решения и выводы аргументированы.

Содержание диссертационной работы соответствуют паспорту научной специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы по следующим пунктам:

- п. 2. «Разработка методов анализа режимных параметров основного оборудования электростанций»;
- п. 4. «Разработка методов оценки надежности электрооборудования, структурных схем и схем распределительных устройств электростанций»;
- п. 6. «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике»;
- п. 11. «Разработка методов анализа структурной и функциональной надежности электроэнергетических систем и систем электроснабжения».
- п. 13. «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике».

Основные положения опубликованы в 7 печатных работах, в том числе в 2 работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ, включая 5 статей в зарубежных изданиях, входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus.

Диссертация отвечает требованию указания ссылок на заимствованные материалы или отдельные результаты.

8. Основные замечания по работе

1. Автором широко используются понятия «методы статистического моделирования» и «методы статистических испытаний». При этом не понятно, когда автор говорит о моделировании, а когда об испытаниях. Не совсем убедительными представляется утверждения автора о том, что сходимость методов Монте-Карло в незначительной степени зависит от размерности задачи оценки балансовой надежности ЭЭС.

2. Известно, что двойственные переменные линейного и нелинейного программирования при оценке ПБН методами статистического моделирования могут рассматриваться как индикаторы дефицитности анализируемого режима ЭЭС (функции, применяемые в методах идентификации редких событий). При рассмотрении результирующей эффективности, рассматриваемых в работе аналитических методов (методы точечной оценки и др.), недостаточно четко показано влияние и воздействие процедуры оптимального распределения нагрузки между источниками генерации и дефицита мощности между узлами электропотребления.

3. Исследования автора в области балансовой надежности ЭЭС направлены, в основном на анализ вероятностных показателей балансовой надежности. При

этом приведенный и используемый в работе показатель *LOLP* не находит широкого применения (в основном скандинавские страны). В тоже время этот показатель в какой-то мере похож на широко применяемый в России показатель интегральной вероятности появления дефицита мощности. Автор путает некоторые понятия. Показатель *LOLE* – это не математическое ожидание величины отключения нагрузки, а среднее вероятностное значение дней дефицита мощности. В работе не приведены вероятностные показатели балансовой надежности, используемые в странах Западной Европы. Эти вопросы должны быть отражены в диссертационном исследовании.

4. Представленные в автореферате методы идентификации редких событий обладают примерно одинаковой вычислительной эффективностью. При этом остается непонятным, в каких случаях надо отдавать приоритет тому или другому.

5. В рассматриваемых автором вопросах обеспечения балансовой надежности ЭЭС не часто используется предлагаемый автором критерий оптимизации «минимум коэффициента вариации». Насколько правомочен данный критерий для окончания итерационного цикла поиска множества редких событий?

6. Представляет определенный интерес, насколько актуальна проблема балансовой надежности с учетом ВИЭ и насколько полученные в работе результаты применимы в условиях энергосистемы Египта? К сожалению в работе об этом практически ничего не сказано.

9. Общее заключение

Представленная диссертационная работа Абдель Менаэм Амир Салах Хассан является самостоятельной, законченной научно-квалификационной работой. В ней содержится новое научно обоснованное техническое решение задачи оценки балансовой надежности электроэнергетических систем с ВИЭ. Работа обладает научной новизной и практической значимостью.

Разработанные модели и методы оценки показателей балансовой надежности распределительных электрических сетей с ВИЭ являются решением важной научно-технической задачи отраслевого значения. Предложенные автором диссертации решения достаточно аргументированы.

Содержание диссертации полностью соответствует поставленным задачам и отражает последовательность их решения. Работа базируется на достаточном числе исходных данных, примеров и расчетов, написана логичным, понятным языком, по каждой главе в работе сделаны чёткие и аргументированные выводы.

Основные научные результаты диссертации изложены в 7 печатных работах, опубликованных как в соавторстве, так и самостоятельно; 2 из них в изданиях, рекомендованных ВАК. Результаты работы докладывались на 4 конференциях и семинарах различного уровня. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации и разработанным теоретическим положениям, на-

учной новизне полученных результатов и их практической значимости с учетом сведений об аprobации, публикациях и внедрении.

Это дает основание утверждать, что диссертационная работа на тему: «Improving evaluation methods of adequacy for renewable energy integrated power systems» («Развитие методов оценки показателей балансовой надежности энергосистем с возобновляемыми источниками энергии») полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении учёных степеней в УрФУ, а ее автор Абдель Менаем Амир Салах Хассан заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы.

Официальный оппонент

доктор технических наук, старший научный сотрудник, директор института социально-экономических и энергетических проблем Севера Кomi научного центра Уральского отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кomi научный центр Уральского отделения Российской академии наук»,

.... Россия, г. Сыктывкар,
ул. Коммунистическая, д. 26.;

Телефон: +7-8212-20-34-92;
e-mail: chukreev@iespn.komisc.ru

Чукреев
Юрий Яковлевич



Дата 21. 06. 2021

Подпись Чукреева Ю.Я. заверяю

