

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский
технический университет»,
кандидат технических наук



Евгений Юрьевич Семенов
«19» марта 2018 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» на диссертацию Третьяковой Елены Семеновны «Анализ энергоэффективности глубокой компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий и городов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 - Электрические станции и электроэнергетические системы.

1. Актуальность диссертационного исследования

Актуальность темы диссертации обусловлена увеличением числа и мощности электроприемников, потребляющих реактивную мощность (РМ). При транспортировании РМ по электрической сети возникают дополнительные потери активной мощности, которые покрываются активной мощностью генераторов, что приводит к дополнительным расходам энергоресурсов. РМ в отличие от активной мощности может генерироваться компенсирующими устройствами и линиями электропередачи. При этом снижение потерь активной мощности реализуется управлением, оптимизацией, планированием электрических режимов и напрямую связано с установкой источников реактивной мощности у потребителей, с учетом анализа электропотребления и выбора мест и методов компенсации РМ, с учетом разветвленности и сложности сетей электроснабжения городов и крупных промышленных предприятий. Специфика компенсации РМ в сложной электрической сети требует повышения быстродействия и эффективности применяемых алгоритмов, реализуемых вычислительной техникой. Задача получения эффекта от компенсации РМ в такой многокритериальной постановке в полной мере не исследована. Поэтому данная диссертационная работа, целью которой является решение обозначенной проблемы, безусловно, является актуальной для электроэнергетики.

2. Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка сокращений, списка литературы, включающего 142 библиографических ссылки, десяти приложений, общим объемом 196 страниц.

Во введении обоснована решаемая проблема и её актуальность, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, научная новизна полученных результатов и их теоретическая и практическая значимость. Кроме этого, приведены, выносимые на защиту основные положения, а также сведения о методах исследований и достоверности их результатов, апробации и публикации материалов по тематике диссертации, реализации результатов работы, структуре и объеме диссертации.

В первом разделе приведены нормативные документы, определяющие эффективное использование электроэнергии и регламентирующие степень компенсации РМ. Приведена информация по положительной динамике компенсации РМ в Российской Федерации в сетях высокого напряжения, по развитию технологии управляемых линий электропередачи переменного тока (FACTS), по быстродействию статических устройств регулирования напряжения и РМ в воздушных ЛЭП 10-750 кВ, показана их неприемлемость для низковольтных сетей, которые составляют порядка 50% всех сетей страны. Дана оценка энергоаудиторским проверкам в стране, в частности по решению вопросов снижения потерь электроэнергии. На основе анализа работ, исследующих проблемы РМ, выявлена новая проблематика, связанная с выбором и нормированием коэффициента РМ, иначе говоря, глубины компенсации РМ. Автором предложено уточнение терминов: коэффициенты РМ, установленные нормативным документом, называть «**нормальными коэффициентами**», а компенсацию РМ, при которой значение коэффициентов ниже нормативных, называть «**глубокой компенсацией**».

Показана необходимость решения оптимизационной задачи для определения степени компенсации РМ из-за увеличения затрат на компенсирующие устройства при уменьшении потерь активной мощности при транспортировании электроэнергии, и из-за возможности уменьшения сечения протяженных кабельных линий за счет уменьшения потерь напряжения при компенсации реактивной мощности и размещении КУ максимально близко к потребителю.

Показано, что отмена поощрительных и штрафных надбавок потребления реактивной мощности, которая не имеет отдельного стоимостного выражения для электропотребителей, не стимулирует промышленные предприятия к снижению потребления реактивной мощности.

Во втором разделе показаны точные и приближенные методы решения оптимизационных задач и зависимость получения гарантированно оптимального решения от малой размерности задач. К методам точного

решения отнесены: метод полного перебора, метод направленного перебора, классический метод поиска экстремума, основанный на аппарате дифференциального исчисления, методы динамического программирования. Методы поиска оптимума в зависимости от стратегии делят на: одномерные поиски, численные методы, статистические методы. Для учета различного вида ограничений показаны методы линейного и нелинейного программирования. Показано, что с увеличением размерности задачи экспоненциально растет количество операций, и в этом случае применяют эволюционные методы решения. Для каждого класса оптимизационных задач выдвинуты следующие критерии: эффективность, быстродействие, сходимость, влияние начальных условий задачи и параметров алгоритма.

Методом Лагранжа и методом генетического алгоритма (ГА) решена задача компенсации РМ в схеме электроснабжения одного из предприятий для оптимального распределения потоков РМ в системе по минимуму суммарных потерь электрической энергии в сети. Показано, что применение эволюционных алгоритмов для решения задач компенсации РМ позволяет применять реальные эксплуатационные данные, поэтому решения имеют более точные значения, что позволяет экономить финансовые затраты. Показано за счет чего формируется преимущество ГА: не требуется записи точного аналитического выражения целевой функции и непрерывности ее переменных; нет необходимости вычислять производные для определения неопределенных множителей Лагранжа; алгоритм работает быстрее за счет меньшей трудоемкости вычислительной процедуры. ГА позволяет решать задачу оптимизации в случае динамических изменений ее условий.

В третьем разделе показано исследование влияния глубины компенсации РМ на энергоэффективность промышленных предприятий и в городской электрической сети, в частности, на снижение потерь электроэнергии в сети напряжением до 10 кВ, которые характеризуются высокими потерями электроэнергии, с учетом минимизации затрат на компенсирующие устройства (КУ). Показано, что значение коэффициента РМ 0,35 рекомендовано Минэнерго, и что научно-техническая литература не приводит объяснения оптимальности этого значения. Естественное значение $\text{tg } \varphi$ в сетях до 1000 В от 0,5 до 0,7. Возможно, для сетей низкого напряжения $\text{tg } \varphi = 0,35$ и является оптимальным значением, поэтому при решении оптимизационной задачи верхнее значение коэффициента РМ ограничено значением равным 0,6. Электрические сети низкого напряжения характеризуются большим количеством коммутационных переключений, которые в свою очередь могут сопровождаться как провалами, так и всплесками напряжения, поэтому значение $\text{tg } \varphi$ равное нулю может привести к неустойчивой работе асинхронных двигателей, поэтому он был ограничен снизу значением 0,1. Сформулирована оптимизационная задача с ограничениями, описание которой считается универсальным по отношению к

структуре сети, которая содержит «модель задачи» и «метод оптимизации». В «модели задачи» выполнен расчет режима электрической сети расчетом потокораспределения. В качестве «метода оптимизации» применен алгоритм роя частиц с адаптацией. Показано, что глубокая компенсация до значения коэффициента РМ от 0 до 0,1 позволяет на промышленных предприятиях и в городских электрических сетях достичь наибольшего энергосбережения.

В четвертом разделе исследовалась глубокая компенсация РМ в сети электроснабжения промышленного предприятия для снижения потерь электроэнергии с учетом минимизации затрат на кабельную продукцию. Анализ сечений кабельных линий схемы электроснабжения на предприятии показал, что они завышены на одну или две ступени от их значений по длительно допустимому току для обеспечения нормируемой величины потерь напряжения. Сформулирована оптимизационная задача с ограничениями, для решения которой использовалась многоэтапная процедура. Показано, что при длине линии 50 м и более, для эффективного использования электрической энергии, следует проводить компенсацию РМ. При длине питающей линии 100 м и более, в зависимости от стоимости КУ, следует проводить глубокую компенсацию РМ до значений $\text{tg } \varphi$ от 0,15 до 0,10.

В пятом разделе представлены результаты технико-экономического обоснования глубокой компенсации РМ с учетом показателей, которые учитывают фактор времени: чистого дисконтированного дохода, индекса прибыли, дисконтированного срока окупаемости и внутренней нормы доходности. Показано, что с точки зрения дисконтированного срока окупаемости, проект компенсации РМ до значения $\text{tg } \varphi=0,35$ будет более привлекательным, но, с точки зрения чистого дисконтированного дохода, индекса прибыли и внутренней нормы доходности, компенсировать РМ до значения $\text{tg } \varphi=0,1$ выгоднее.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные при решении поставленных задач и обеспечившие достижение цели диссертационной работы.

3. Основные научные результаты, их новизна и значимость

Основные научные результаты диссертационной работы состоят в следующем.

- Разработана и опробована методика снижения технологического расхода электроэнергии и улучшения технико-экономических показателей системы электроснабжения за счет выполнения глубокой компенсации РМ на предприятиях путем многокритериальной оптимизации с учетом снижения материальных затрат на кабельную продукцию;

- Разработаны алгоритмы, которые могут быть использованы в электрических сетях промышленных предприятий и сетях электроснабжения городов, проектных и исследовательских организациях для решения задач

анализа режимов электроснабжения, поиска оптимального сочетания компенсирующих установок РМ и регулирования потоков мощности, выбора оптимальной схемы электрической сети;

- Предложен оптимальный выбор источников РМ на основе комбинированного алгоритма выбора мощности источников РМ, состоящего из алгоритма роя частиц с адаптацией его параметров, и расчета установившегося режима электрической сети с помощью программы RastrWin при заданных ограничениях;

- Предложен вывод, что компенсацию реактивной мощности в сетях напряжением 10 (6) и 0,4 кВ следует выполнять до значения коэффициента реактивной мощности $\text{tg}\varphi$ от 0 до 0,1 на основе актуального технико-экономического обоснования глубокой компенсации РМ и сравнительного анализа с учетом чистого дисконтированного дохода, индекса прибыли, дисконтированного срока окупаемости и внутренней нормы доходности.

Научная новизна исследований и полученных автором результатов состоит в разработке комплексного подхода к компенсации РМ в сетях электроснабжения промышленных предприятий и городов, позволяющего для каждого аспекта этой сложной проблемы разрабатывать и применять наиболее эффективные методы, способы и средства.

- Проведен всесторонний анализ принципов и условий энергоэффективности компенсации РМ в сетях электроснабжения промышленных предприятий и городов и доказана необходимость существенной корректировки рекомендованных нормативных значений с переходом к принципу глубокой компенсации, отличающемуся значением коэффициента РМ близкому к значениям 0 – 0,1.

- Решена двухкритериальная оптимизационная задача компенсации РМ с учетом снижения материальных и финансовых затрат на кабельную продукцию.

- Впервые для решения оптимального размещения КУ и выбора их мощности применен алгоритм роя частиц с адаптацией его параметров, позволяющий определить глобальный минимум целевой функции.

- Выполнено актуальное технико-экономическое обоснование глубокой компенсации РМ и дан сравнительный анализ с учетом чистого дисконтированного дохода, индекса прибыли, дисконтированного срока окупаемости и внутренней нормы доходности.

Значимость результатов: Диссертационная работа Третьяковой Е.С. выполнена на высоком теоретическом уровне по тематике, актуальной для электроэнергетики России, и вносит большой вклад в решение важной научно-технической проблемы компенсации РМ в сетях электроснабжения промышленных предприятий и городов, на основе наиболее эффективных методов, способов и средств.

4. Практическая ценность результатов диссертационной работы

Практическая ценность результатов диссертационной работы состоит в следующем:

1. Разработанные методики и проведенные расчеты для промышленных предприятий показали, что компенсация РМ от значения $\text{tg } \varphi = 0,35$ до значения $\text{tg } \varphi 0,1 - 0,15$ позволяет снизить потери активной мощности в сети на 39% для предприятия, где средняя протяженность питающих кабельных линий 150 - 300 м, и на 8% для предприятия, где она составляет 50 - 150 м. Таким образом, снижается технологический расход электроэнергии, связанный с ее передачей;

2. Показано, что, при глубокой компенсации, возможна экономия алюминия на 7,4% и меди почти на 4%, что приводит к улучшению технико-экономических показателей систем электроснабжения предприятий;

3. Установлена зависимость между мощностью электроприемника и длиной питающей кабельной линии для оценки необходимости степени компенсации РМ;

4. Выполненные исследования и разработанные алгоритмы могут быть использованы на промышленных предприятиях и в городских электрических сетях, для поиска оптимального сочетания компенсирующих установок РМ и регулирования потокораспределения, выбора оптимальной схемы электрической сети.

5. Соответствие содержания паспорту специальности

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 05.14.02 - «Электрические станции и электроэнергетические системы»:

– П. 8 «Разработка методов статической и динамической оптимизации для решения задач в электроэнергетике»;

– П. 12 «Разработка методов контроля и анализа качества электроэнергии и мер по его обеспечению»;

– П. 13 «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике».

6. Апробация и публикация результатов диссертационной работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 7 международных и всероссийских научно-технических конференциях. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе 5 статей в журналах, включенных в перечень ВАК РФ две работы зарегистрированы в наукометрической базе SCOPUS.

Личный вклад автора в работах не менее 60%.

7. Реализация результатов работы

Результаты работы внедрены на двух предприятиях Госкорпорации «РОСАТОМ», о чем имеются акты внедрения.

8. Замечания по диссертации

1. В работе расчет потокораспределения в электрической сети выполняется без возможности определения мощности $Q_{ку}$ в узлах по условиям поддержания номинального напряжения.

2. Мощность КУ определяется для дискретных значений мощностей нагрузок и величин напряжений в опорных узлах, однако не показана возможность и необходимость регулирования мощностей КУ при изменении параметров режима.

9. Заключение

Отмеченные замечания не снижают, без сомнения, высокого научного уровня диссертации и ее положительной оценки. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на актуальную тему. Полученные на основе проведенных исследований результаты являются значимыми для современной электроэнергетики. Актуальность, научная новизна, практическая значимость, содержание и публикации диссертационной работы соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, и п.п. 9-14, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» с изменениями Постановления Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2016 г. № 335 «О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней», а её автор Третьякова Елена Семеновна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 — Электрические станции и электроэнергетические системы.

Отзыв на диссертацию и автореферат рассмотрен и принят единогласно на заседании кафедры Электрических станций, сетей и систем института энергетики ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»

Протокол № 7 от «19» марта 2018 года.

Заведующий кафедрой электрических станций, сетей и систем,
директор института энергетики
кандидат технических наук, доцент

Федчишин
Владим Валентинович

Почтовый адрес: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский
технический университет»
e-mail: ynd@istu.edu, тел. 8-3952-40-50-50

