

На правах рукописи



Ерёмин Олег Игоревич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОМПЕНСАЦИИ
РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МНОГОЦЕЛЕВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ**

Специальность 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Н. Новгород – 2007

Работа выполнена в Нижегородском государственном техническом университете на кафедре "Электроэнергетика и электроснабжение".

Научный руководитель	–	доктор технических наук, профессор Лоскутов Алексей Борисович
Официальные оппоненты	–	доктор технических наук, профессор Степанов Валентин Павлович
	–	кандидат технических наук, Шалаев Сергей Алексеевич
Ведущая организация	–	Нижегородское представительство ООО «Проектный центр Энерго»

Защита состоится **17 мая 2007** г. в **14** часов, в аудитории № **1258** на заседании диссертационного совета Д 212.165.02 в Нижегородском государственном техническом университете по адресу: г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке технического университета.

Отзывы по автореферату (в двух экземплярах, заверенных печатью) направлять по адресу: 603 950, г. Нижний Новгород, ГСП-41, ул. Минина, 24, НГТУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.165.02.

Автореферат разослан "**16**" **апреля 2007** г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

Соколов В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Компенсация реактивной мощности в распределительных электрических сетях является весьма эффективным мероприятием, улучшающим следующие показатели установившихся режимов работы энергосистем:

- 1) существенное снижение технологического расхода электроэнергии на ее транспорт (снижаются или отсутствуют перетоки реактивной мощности);
- 2) улучшение качества напряжения в узлах сети;
- 3) снижение затрат на оборудование (меньшие сечения проводов и кабелей, меньшая установленная мощность трансформаторов).

Решению задач, связанных с компенсацией реактивной мощности в энергосистемах и системах электроснабжения промышленных предприятий, уделяли внимание многие исследователи, среди которых необходимо отметить таких как: Арзамасцев Д.А., Веников В.А., Железко Ю.С., Иванов В.С., Идельчик В.И., Илларионов Г.А., Каждан А.Э., Казанцев В.Н., Карпов Ф.Ф., Каялов Г.М., Ковалев И.Н., Куренный Э.Г., Липес А.В., Мукосеев Ю.Л., Пекелис В.Г., Соколов В.И., Солдаткина Л.А., Тайц А.А., Файбисович Д.Л., Щербина Ю.В.

Важно отметить, что проблема оптимальной компенсации реактивной мощности может быть сформулирована по-разному для стадии эксплуатации и для стадии проектирования:

- 1) для эксплуатации – это задача оптимального управления имеющимися источниками реактивной энергии;
- 2) для проектирования – это задача оптимального размещения источников реактивной энергии.

При этом можно отметить, что первая формулировка задачи относится скорее к техническим вопросам оптимального управления режимом работы сети.

Вторая, очевидно, должна учитывать большее количество факторов (например, еще и затраты на конденсаторы или другие средства компенсации, наличие площадей для их установки, и так далее) и имеет несколько недоминируемых вариантов решения, предпочтительность которых определяется трудноформализуемыми внешними условиями среды (например, взаимоотношениями с поставщиком электроэнергии).

Важность рассматриваемой задачи становится все более очевидной в современных условиях восстановления, а местами и роста нагрузок в энергосистемах. Текущий годовой прирост потребления электроэнергии составляет около 5,5 %. Тенденции таковы, что уже к 2008 году следует ожидать восстановления нагрузок на уровне 1991 г. При этом располагаемая мощность электростанций в настоящее время значительно меньше той, что была в 1991 г.

Поэтому сегодня вопрос компенсации реактивной мощности в ЭЭС и, в частности, в районах с узлами подключения промышленных потребителей, в

энергосистемах городов, стоит крайне остро, а решение его – весьма актуально.

При этом необходимо отметить, что в настоящее время рост технического совершенства вычислительной техники позволяет перейти от приближенных методов моделирования к более точным. Для проблем оптимизации вообще и для оптимальной компенсации реактивной мощности это означает возможность перехода от решения одноцелевой задачи оптимизации с ограничениями к решению задачи многоцелевой оптимизации, где наиболее традиционные ограничения могут войти во множество целей задачи.

Многоцелевой подход позволяет более комплексно подходить к задаче оптимизации реактивной мощности, более точно описывать ее условия, получая тем самым решения, более соответствующие реальной задаче.

Среди методик многоцелевой оптимизации в последнее время большую известность получают различные эвристические алгоритмы и, в частности, так называемые эволюционные вычисления. Использование аппарата эволюционных вычислений позволяет получать алгоритмы, не чувствительные к виду и области определения как целевых функций, так и параметров задачи. При этом можно говорить об отыскании глобальных оптимумов задачи.

Таким образом, весьма актуальной представляется разработка методики решения задачи многоцелевой оптимизации компенсации реактивной мощности, использующей эволюционные вычисления.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Исследование связано с работами кафедры "Электроэнергетика и электроснабжение", проводимыми в соответствии с Федеральной целевой программой "Энергоэффективная экономика" (2002 –2006 годы); Федеральной целевой научно-технической программой "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники" на 2002–2006 годы, блока "Поисково-прикладные исследования и разработки", раздела "Топливо и энергетика". Работа выполнена в соответствии с конкурсом, объявленным Федеральным агентством по науке и инновациям министерства образования и науки РФ на 2005 год на право заключения контрактов по направлению "Разработка и внедрение конкурентоспособных электросберегающих технологий".

Цель исследования – разработка методических основ оптимального размещения устройств компенсации реактивной мощности в энергосистеме. Для этого решаются следующие задачи:

- критический анализ существующих методик оптимизации размещения устройств компенсации реактивной мощности в сети;
- анализ существующих математических методов решения задач многоцелевой оптимизации,
- разработка множества критериев определения оптимальных (недоминируемых) решений по степени компенсации реактивной мощности в сети;

- разработка алгоритма многоцелевой оптимизации размещения устройств компенсации реактивной мощности в электрической сети на основе эволюционных стратегий,

- разработка специфических операторов эволюционной стратегии, таких как рекомбинация решений, случайное изменение и отбор решений.

Объектом исследования является комплекс "энергосистема – потребители электрической энергии".

Методы исследования. В работе использовались методы теории эволюционных вычислений, математического моделирования технических систем, экономико-математического анализа и теории множеств.

В работе автор защищает:

- новый подход к практическому решению задачи оптимального размещения устройств компенсации реактивной мощности в сети энергосистемы, выраженный в ее решении как задачи многоцелевой оптимизации. Это позволяет учесть наиболее традиционные ограничения в качестве критериев оптимизации и, тем самым, повысить точность и практическую пригодность решений;

- математическую модель, описывающую совокупность режимов работы района электроэнергетической системы, которая позволяет реализовать многоцелевую и многопараметрическую оптимизацию режима работы электроэнергетической сети по реактивной мощности;

- систему критериев для определения множества недоминируемых решений задачи оптимизации;

- методику решения задачи многоцелевой оптимизации размещения устройств компенсации реактивной мощности в энергорайоне с использованием эволюционных вычислений.

Научная новизна и теоретическая значимость данной работы заключается в следующем:

1. Предложен подход к задаче оптимальной компенсации реактивной мощности как к задаче многоцелевой (многокритериальной) оптимизации. Новый подход позволяет перевести наиболее традиционные ограничения (например, уровни напряжения в узлах сети) в новые целевые функции, тем самым, полученные решения задачи больше соответствуют реальным условиям.

2. Предложена математическая модель на основе теории эволюционных вычислений, позволяющая вести одновременную многоцелевую и многопараметрическую оптимизацию режима работы энергосистемы по реактивной мощности. Сформирован набор критериев оптимизации, отражающий важные стороны задачи оптимальной компенсации реактивной мощности для лица, принимающего решения. В качестве критериев предложены как технические, так и экономические условия решения указанной задачи.

3. Разработан алгоритм решения задачи оптимальной компенсации реактивной мощности для энергосистемы. Данный алгоритм позволяет проводить многопараметрическую и многоцелевую оптимизацию размещения

устройств компенсации реактивной мощности на стадии проектирования энергосистем.

Практическая ценность данной работы заключается в следующем:

1. Разработанная методика решения задачи оптимального размещения источников реактивной мощности в энергосистемах может быть использована проектными организациями при проектировании энергосистем.

2. Использование данной методики при оптимизации реконструируемого электросетевого района по реактивной мощности позволит получить наиболее подходящий вариант для текущих условий решения задачи оптимальной компенсации реактивной мощности, тем самым получив значительный экономический эффект.

Реализация результатов работы. Положения диссертационной работы использованы при разработке автоматизированного рабочего места отдела проектирования энергосистем ООО "Проектный центр Энерго", г. Москва, ООО "Энергосетьпроект-НН", г. Н. Новгород. Содержание исследований нашло отражение в учебных курсах "Оптимизация в ЭЭС", "Применение ЭВМ в электроэнергетике" и в дипломном проектировании.

Апробация результатов диссертации. Основные положения диссертационной работы и её отдельные результаты были представлены на III и V Международной молодёжной научно-технической конференции "Будущее технической науки", Нижний Новгород, 2004 г.; ежегодной научно-практической конференции "Нижегородская сессия молодых ученых", Нижний Новгород, 2005 г; Международной научно-практической конференции "Молодежь и наука XXI века", Ульяновск, 2006 г.; XII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых "Современные техника и технологии", Томск, 2006 г. По результатам последней конференции представленные доклады были награждены дипломом первой степени.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 научных работ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 99 наименований. Объём диссертации составляет 119 страниц основного текста, включая 11 рисунков и 5 таблиц, с двумя приложениями.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана необходимость компенсации реактивной мощности в ЭЭС, кратко рассмотрены возможные формулировки задачи для стадии проектирования и стадии эксплуатации.

В первой главе дан аналитический обзор состояния вопроса компенсации реактивной мощности в электрических сетях, поставлена задача диссертации.

Проведенный анализ нормативно-технической базы по вопросу компенсации реактивной мощности показал, что, несмотря на неоспоримую важность проблемы сегодня не существует общего федерального нормативного акта, регулирующего вопросы размещения устройств компенсации ре-

активной мощности и согласовывающего интересы различных субъектов (потребителей электрической энергии, электросетевых и генерирующих компаний) единой энергосистемы.

Принятие такого документа необходимо. При этом можно предполагать, что стимулирование компенсации будет проводиться прежде всего с помощью экономических мер.

Особый интерес в данных условиях представляет механизм, позволяющий определить оптимальные значения компенсации реактивной мощности в отдельном районе энергосистемы с заданными граничными условиями и несколькими участниками задачи (несколько различных потребителей, поставщиков).

Анализ существующих распространенных теоретических и методических подходов к решению проблемы показал неудобство их практического применения в условиях рыночной экономики. Однако необходимо отметить, что основной подход теоретических исследований, выраженный в системном взгляде на связку ЭЭС – потребитель и декомпозиции задачи компенсации с заданием некоторых граничных условий в виде затрат на реактивную мощность и энергию объективно отражает действительность и должен быть применён для успешного решения задачи.

Основными недостатками существующих методик являются:

- отсутствие альтернатив в решении проблемы,
- рассмотрение задачи в условиях неограниченных ресурсов, в то время как это не соответствует действительности.

Сформулирована задача диссертации, состоящая в разработке методики определения оптимального размещения устройств компенсации реактивной мощности в энергосистеме, лишенной указанных недостатков. Результатом оптимизационного расчета должно быть множество Парето-оптимальных вариантов, позволяющих лицу, принимающему решение, сделать осознанный выбор наиболее подходящей альтернативы.

Во второй главе разрабатываются методические основы разрабатываемого алгоритма.

Отмечено, что сложилось ведомственное и информационное разделение единой энергосистемы на подсистему передачи (и выработки) энергии и подсистему потребления (системы электроснабжения потребителей).

Поэтому область решения настоящей задачи необходимо ограничить в соответствии со сложившимся ведомственным разделением единой энергосистемы и рассматривать задачу размещения источников реактивной мощности в электросетевом районе. При этом потребителей учесть нагрузками, подключенными к подстанциям сети, являющимися центрами питания для сетей низшего класса напряжения.

Сети потребителей, оставшиеся за рамками решаемой задачи, в свою очередь, должны будут решать задачи компенсации в собственной системе электроснабжения, исходя из заданных энергосистемой граничных условий по реактивной мощности. Граничные условия будут определяться как техническими факторами (возможностями передачи), так и экономическими (ее

стоимостью). Методики решения таких задач разработаны ранее и не утратили своей актуальности.

Для представления района электроэнергетической системы, в которой проводится оптимизация по реактивной мощности и коэффициентам трансформации предлагается следующая модель:

Все возможные состояния системы, отличающиеся друг от друга значениями параметров оптимизации и характеризуемые определенным набором параметров системы и параметров режима ее работы, составляют общее пространство поиска решений задачи многоцелевой оптимизации.

Каждое состояние характеризуется следующими параметрами системы: установленная мощность средств компенсации реактивной мощности в каждом узле сети; коэффициенты трансформации силовых трансформаторов с РПН и ПБВ, установленных в системе.

В рамках решаемой задачи оптимизации по реактивной мощности остальные параметры системы считаются неизменными.

Также каждое возможное состояние характеризуется основными параметрами режима – уровнями напряжения в каждом узле системы. Исходя из известных напряжений в узлах, могут быть определены значения нагрузок узлов (по статическим характеристикам нагрузки по напряжению), перетоки в ветвях схемы, потери мощности и энергии на транспорт.

В указанном пространстве возможных состояний системы (дискретном и бесконечном) осуществляется поиск оптимальных состояний системы, причем под оптимальностью состояния понимается его доминирование над остальными не по одному, а по целой системе критериев (целевая функция представляет собой вектор).

В рамках предложенной модели становятся особенно заметны недостатки традиционного решения проблемы оптимизации сети по реактивной мощности:

- в силу подхода к задаче как к задаче одноцелевой оптимизации необходимо накладывать на пространство поиска различные ограничения (например, по допустимому уровню напряжения в узлах);
- такие ограничения не позволяют учитывать различную важность разных узлов системы;
- использование традиционных численных методов поиска экстремумов невозможно на дискретном множестве, как следствие, для их использования необходимо упрощать модель, подменяя дискретные величины непрерывными, а затем проводя обратные преобразования после решения.

В связи с этим предлагается применять следующий подход к многоцелевой оптимизации: рассматривать в качестве оптимальных недоминируемые решения по Парето, проводить построение полного множества Парето, а затем выбирать наиболее подходящее решение экспертным путем.

Для работы методики непосредственно в дискретном пространстве поиска предлагается использовать эволюционные алгоритмы, позволяющие ра-

ботать с любыми целевыми функциями, определенными на любых пространствах.

Для формирования множества целей задача компенсации реактивной мощности анализируется с позиции лица, принимающего решения (ответственного за инвестиции).

При таком подходе задача рассматривается как инвестиционный проект, который характеризуется сроками выполнения, потребными ресурсами и получаемыми благами.

На стадии технического проектирования определить реальные сроки выполнения проекта крайне сложно, а оценить их в денежном выражении практически невозможно, несмотря на наличие теоретического аппарата и программного обеспечения в области управления проектами. При этом руководитель проекта в силу опыта предыдущих работ, большого объема неформализуемой информации, может легко представить ориентировочные сроки выполнения проекта и сравнить с прочими факторами. Поэтому предложено решать поставленную задачу в отношении потребных финансовых затрат и получаемых благ.

Известно, что в силу целого множества причин наиболее распространенным средством компенсации являются конденсаторные батареи со ступенчатым регулированием мощности.

Можно отметить, что для данной задачи затраты определяются затратами на сооружение установок компенсации реактивной мощности Z_{Σ} , которые складываются из собственно стоимости конденсаторов $Z_{БСК}$, стоимости площадей для их установки $Z_{пл}$ и стоимости коммутационного оборудования (для высоковольтных батарей) $Z_{КУ}$:

$$Z_{\Sigma} = Z_{БСК} + Z_{пл} + Z_{КУ}. \quad (1)$$

Если стоимость оборудования можно определить достаточно точно, то стоимость отвода площадей $Z_{пл}$ в (1) на стадии прогнозирования, напротив, практически не поддается точному определению и может колебаться в очень широких пределах. Поэтому предложено разделять методом экспертных оценок все множество узлов анализируемой сети на три подмножества, по мере усложнения установки конденсаторных батарей. Ввести штрафную функцию, равную нулю для обычных узлов, большую для узлов с затрудненной установкой и очень большую для узлов, где установка практически невозможна.

Результирующие выгоды от мероприятий по компенсации реактивной мощности определяются несколькими составляющими:

- улучшение качества напряжения в узлах (нормализация уровня),
- снижение общих потерь на транспорт электроэнергии,
- увеличение потерь активной мощности за счет затрат на выработку реактивной в источниках реактивной мощности,
- уменьшение величины надбавок энергоснабжающей организации за потребление реактивной мощности.

Если первый параметр, несмотря на его важность, оценить в денежном выражении не представляется возможным, то все для всех остальных возможен расчет финансовых показателей.

При этом отмечено, что поддержание напряжения в различных узлах имеет разную важность, что необходимо учесть при составлении целевых функций.

По результатам анализа предлагается сформировать целевые функции на основе следующих величин:

- затраты на установку устройств компенсации реактивной мощности;
- величина штрафной функции за установку в местах, где она затруднена;
- стоимость технических потерь в электроэнергетической системе за заданный период времени;
- суммарная величина штрафных санкций энергоснабжающей организации за чрезмерное потребление реактивной мощности;
- величины уровней напряжения в узлах, причем узлы ранжируются по важности.

Сформулированы основные черты предлагаемой модификации эволюционной стратегии. Графически предлагаемый алгоритм отражен на рис. 1.

Расчет параметров режима системы предлагается вести с помощью традиционных численных методов.

В третьей главе формализуются полученные методические решения.

Показано, что для расчета одной из целевых функций – стоимости потерь электроэнергии в сети на транспорт целесообразно использовать метод числа часов наибольшей нагрузки τ . При этом погрешность расчета невелика и составляет около 1,5% для сетей 35-220 кВ.

Для расчета параметров установившегося режима работы энергосистемы предлагается использовать стандартный подход с использованием уравнений узловых напряжений.

Поиск наилучшего решения, основывается на эволюционных алгоритмах. Принцип его действия можно сформулировать следующим образом: над исходным множеством возможных состояний системы совершаются специализированные операции случайного изменения и рекомбинации, при этом получается следующее множество состояний, являющееся выборкой из общего пространства поиска оптимального состояния.

Вероятность применения операторов случайного изменения и рекомбинации для каждого отдельного состояния системы различна и определяется его оптимальностью по отношению к другим. Вероятность рекомбинации для более выгодного состояния выше. При этом остальные возможные комбинации параметров системы также участвуют в определении состава выборки. Это делается для того, чтобы не утратить разнообразия множества решений и избежать расхождения процесса или выявления локального экстремума вместо глобального.

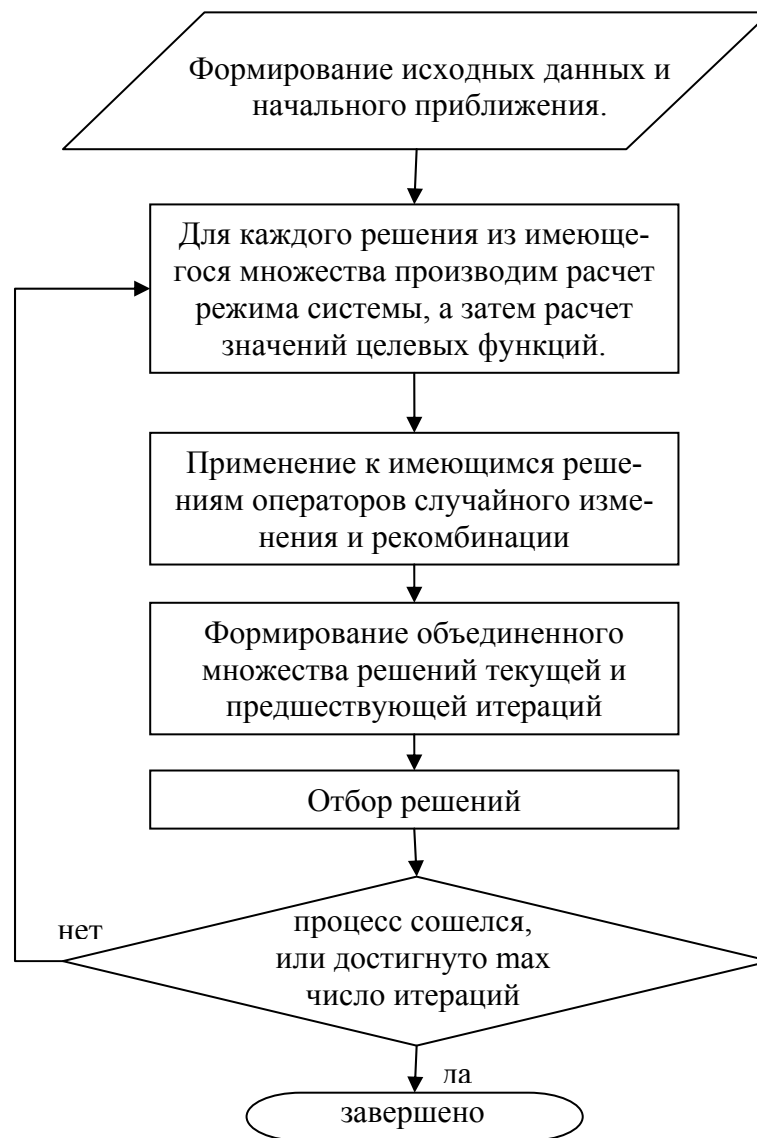


Рисунок 1 – Структурная схема стратегии оптимизации

После формирования текущей выборки из общего пространства поиска производится отбор наиболее оптимальных решений. Процесс повторяется до тех пор, пока не сойдется или не будет произведено максимальное количество итераций

Оптимальность состояния системы определяется, исходя из количества состояний в текущей выборке, над которыми оно доминирует. При этом разнообразие множества доминирующих состояний поддерживается использованием отношений Парето-доминантности и применением процедуры кластеризации, с целью уменьшения недоминируемого множества без уничтожения его характеристик.

Для практического использования алгоритма рис. 1 проведена детализация и формализация методических положений главы 2.

В связи с изложенным выше в целевую функцию затрат на установку средств компенсации войдут только затраты на установку самих батарей и стоимость их подключения к сети (для высоковольтных батарей) без учета стоимости отвода площадей.

F_1 – инвестиции в установку средств компенсации, руб.:

$$F_1 = \sum_{i=1}^n (a \cdot Q_i + b_i), \quad (2)$$

где Q_i – установленная мощность компенсации в i -том узле системы, кВАр;

a – удельная стоимость конденсаторных батарей, руб./кВАр;

b_i – стоимость ячейки распределительного устройства для i -того узла (определяется классом напряжения);

n – число узлов в системе.

Общая штрафная функция за установку в местах, где она затруднена, определяется суммой штрафных функций для каждого узла.

F_2 – общая штрафная функция, о.е.:

$$F_2 = \sum_{i=1}^n A_i, \quad (3)$$

где A_i – штрафная функция i -того узла, руб.

$$A_i \in \mathbf{A} = \{0, A_{\text{ср}}, A_{\text{макс}}\} = \{0, 50\,000, 50\,000\,000\}.$$

Здесь среднее значение штрафной функции соответствует подготовке имеющегося места для установки батарей, а наивысшее – сооружению новой площадки с «нуля» с учетом затрат на землеотвод, подготовку территории, инженерные сети и системы.

F_3 – стоимость годовых потерь электрической энергии на ее транспорт, руб.:

$$F_3 = \alpha \operatorname{Re}[\Delta \underline{S}_{\Sigma}] + \beta \Delta W_{\Gamma}. \quad (4)$$

Здесь α и β – ставки за мощность и за потребленную электроэнергию соответственно двухставочного тарифа, установившегося на рынке; $\Delta \underline{S}_{\Sigma}$ – потери мощности на транспорт электроэнергии

Для одноставочного тарифа и тарифа, дифференцированного по зонам суток, данная зависимость будет выглядеть как (5) и (6) соответственно:

$$F_3 = T_{\text{одност}} \Delta W_{\Gamma}, \quad (5)$$

$$F_3 = \sum_i T_i \Delta W_i. \quad (6)$$

Здесь $T_{\text{одност}}$ – величина одноставочного тарифа, ΔW_{Γ} – годовые потери энергии на транспорт.

$T_i, \Delta W_i$ – величина тарифа и потери i -той зоны суток.

Для расчета суммы надбавок к стоимости энергии за сверхдоговорное потребление реактивной мощности, необходимо предварительно определить сальдо перетоков мощности на границе балансовой принадлежности (например, \underline{S}_1 и \underline{S}_2 на поясняющем рис.2).

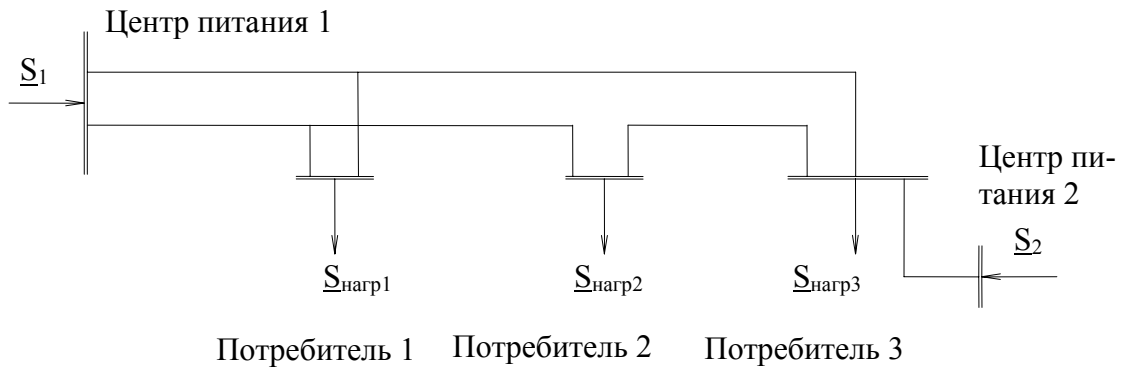


Рисунок 2 – Пояснение к принципу расчета штрафных санкций энергосистемы

После этого, зная договорные значения потребления реактивной мощности Q , на границах, можем рассчитать сумму надбавки по выражению:

$$F_4 = [\text{Im}(S_{cp}) - Q] \cdot \lambda, \quad (7)$$

где λ – величина договорной надбавки к стоимости, руб./МВАр;

$S_{гр}$ – сальдо-переток на границе балансовой принадлежности между потребителем и поставщиком электроэнергии, МВА;

С учетом того, что для разных узлов сети относительный уровень напряжения должен иметь различное значение, имеет смысл в качестве обобщенной характеристики режима оценивать не саму величину напряжения, а отличие действительного напряжения в узле от желаемого.

Таким образом, очевидно, что получение репрезентативной целевой функции по напряжению возможно, только если рассчитывать среднее взвешенное отклонение напряжения в узлах от желаемых значений, причем веса узлов определяются отношением полной выдаваемой ими мощности (как в нагрузку, так и в транзит) к сумме всех нагрузок в системе со всеми перетоками в связях.

Тогда целевая функция может быть представлена в виде среднего взвешенного по мощности отклонения напряжения (8).

$$F_5 = \frac{P_i \cdot |\underline{U}_i - \underline{U}_i^0|}{\sum_{i=1}^n P_i}, \quad (8)$$

где \underline{U}_i – напряжение на i -той шине системы, о.е.,

\underline{U}_i^0 – желаемое напряжение на i -той шине системы, о.е.,

P_i – сумма мощностей нагрузки и транзитных перетоков на i -той шине системы, МВт,

n – количество узлов в системе.

Очевидно, что при таком подходе "важность" узла зависит от режима работы сети, что соответствует действительному положению вещей.

Подытоживая вышесказанное, решаемая задача может быть сформулирована следующим образом:

Найти множество Парето (недоминируемых решений) задачи векторной оптимизации, где вектор целей $\mathbf{F} = \{F_1, F_2, F_3, F_4, F_5\}$, то есть

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n (a \cdot Q_i + b_i) \\ \sum_{i=1}^n A_i \\ \alpha \operatorname{Re}[\Delta S_{\Sigma}] + \beta \Delta W_{\Gamma} \\ [\operatorname{Im}(S_{sp}) - Q_3] \tau_Q \lambda \\ \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot |U_i - U_i^0|}{\sum_{i=1}^n P_i} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

В четвертой главе разработанная методика использована применительно к практической задаче.

Разработано представление множества решений в рамках эволюционной стратегии.

Оптимизация заключается в выборе установленной мощности компенсирующих устройств на каждой шине системы и оптимизации установки ответвлений понижающих трансформаторов.

Величина установленной мощности средств компенсации реактивной мощности для размещения в каждом узле системы представляется вектором решений $\mathbf{Q} = \{Q_i\}$, а коэффициенты трансформации – вектором $\mathbf{n} = \{n_i\}$.

Поскольку область определения оптимизируемых параметров – дискретное множество чисел, то предлагается осуществлять случайное изменение с помощью оператора вида (10).

$$P^{нов} = P^{исх} + \Delta, \quad (10)$$

где $P^{нов}$, $P^{исх}$ – изменяемый параметр (соответственно, его новое и исходное значения),

Δ – дискретная случайная величина, симметричная относительно нуля, с шагом дискретизации, определяемым линейкой номинальных мощностей батарей или положений переключающих устройств. Дискретизация осуществляется для каждого оптимизируемого параметра (значения установленной мощности компенсирующих устройств в каждом узле и коэффициентов трансформации каждого трансформатора).

Для реализации второго оператора получения новых решений предлагается использовать механизм одноточечной рекомбинации. Отличие от обычных генетических алгоритмов – в отсутствии специального кодирования решений перед рекомбинацией. Рекомбинируют векторы решений, представляющие собой последовательно записанные векторы величин установленной мощности компенсирующих устройств и значения коэффициентов транс-

формации. При этом в случайной точке векторы выбранных решений изменяются, как показано на рис. 3.

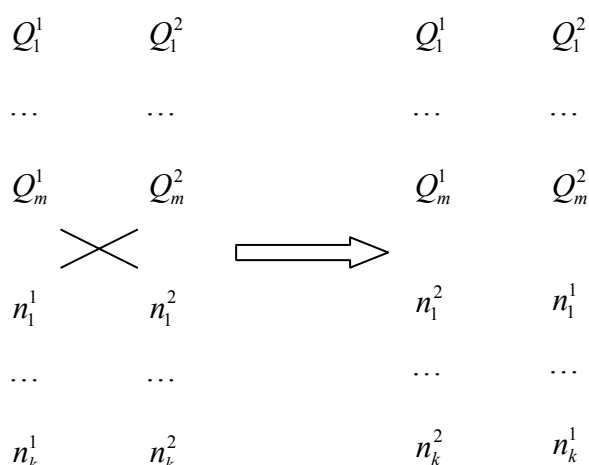


Рисунок 3 – Схема рекомбинации решений. Слева – исходные решения, справа – вновь полученные

Полученные решения добавляются в общее множество решений для последующего отбора.

Отбор решений осуществляется из всего множества исходных и полученных в результате случайных изменений и рекомбинации решений. Предлагается проводить отбор с помощью турнирной схемы с некоторыми модификациями: произвольно выбранное решение соревнуется последовательно со всеми решениями, в случае проигрыша оно заменяется доминирующим решением, которое соревнуется с последующими решениями. Выборка решений осуществляется без возврата.

Поскольку оптимизация ведется одновременно по нескольким целевым функциям, то турнир проводится одновременно по всем параметрам с сохранением отдельной турнирной таблицы для каждой цели.

Здесь возникает некоторая особенность отбора, характерная для множества задач, когда решения, не различающиеся по одному критерию, существенно отличаются по другому. При эквивалентности двух решений по какому-либо параметру доминировать должно то, которое оптимально по какому-либо другому параметру.

Для выявления таких решений без усложнения расчета, рациональной представляется проверка полученных решений на принадлежность существующему приближению к множеству Парето – множеству решений предыдущей итерации.

В настоящей задаче сходимость можно считать достигнутой, когда в новой итерации нет решений, доминирующих над уже имеющимися.

В качестве расчетного примера для практической апробации разработанной методики и анализа полученных результатов произведен расчет кольцевой сети электроснабжения крупного города 330/110 кВ. В расчетной схеме около 100 узлов. Упрощенная принципиальная однолинейная схема расчетной сети приведена на рис. 4.

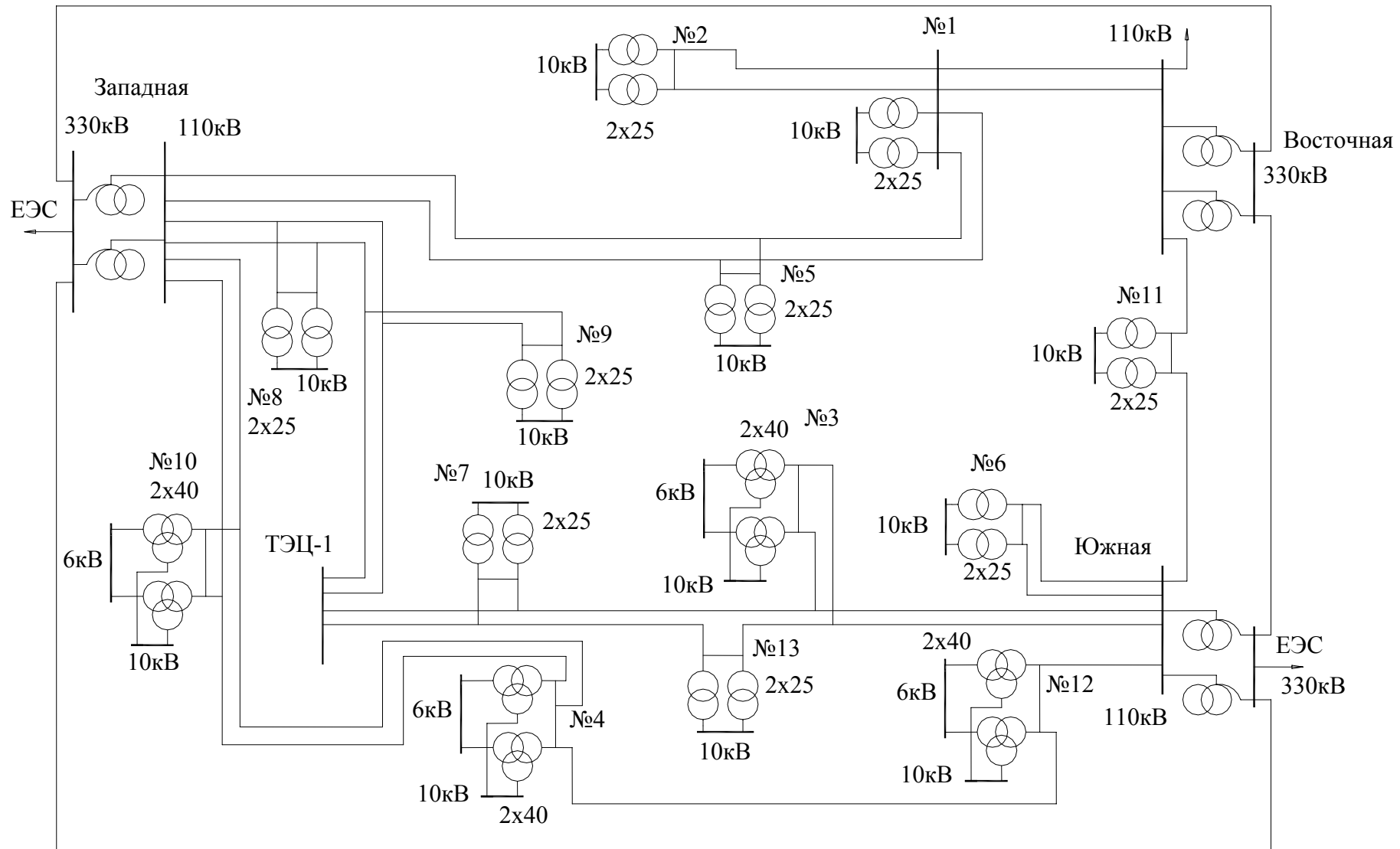


Рисунок 4 – Упрощенная принципиальная однолинейная схема сети, принятой для практического расчета

В качестве оптимальных решений по каждому параметру отбиралось одно наилучшее.

В результате работы алгоритма получено множество недоминируемых решений, представляющее собой пять возможных сочетаний параметров системы: значения установленной мощности компенсирующих устройств в каждом узле расчетной схемы и уставки РПН каждого (авто)трансформатора 110/10(6) кВ и 330/110 кВ.

Время работы алгоритма не определялось и полученный алгоритм не оптимизировался по этому показателю.

Анализ полученных результатов решения задачи оптимального размещения средств компенсации реактивной мощности позволил сделать следующие важные замечания:

- получено множество Парето оптимальных (недоминируемых) решений задачи;
- полученные решения задачи и соответствующий фронт Парето разнообразны;
- на основании полученного множества Парето возможен экспертный выбор одного из вариантов.

Основные результаты диссертационной работы. На основании приведенных исследований получены следующие теоретические и практические результаты:

1. Установлено, что существовавшая ранее методика, направленная на минимизацию приведенных затрат, не в полной мере отвечает требованиям времени и не может использоваться в современных условиях. В связи с этим предложена новая модель представления энергосистемы, в которой производится оптимизация установленной мощности устройств компенсации;

2. Проанализированы возможные подходы к решению задач оптимизации, отмечено, что в современных условиях наиболее многообещающим является подход к задачам оптимизации как к многоцелевым (многопараметрическим);

3. Проанализировано множество критериев, существенных для лица, принимающего решения, в данной задаче оптимального планирования. На основе анализа предложено множество целей оптимизации и разработано формализованное описание целевых функций, что позволяет использовать полученные критерии при практическом решении задачи оптимальной компенсации реактивной мощности;

4. Поставлена и решена задача разработки нового метода, позволяющего получить множество Парето оптимальных решений задачи оптимального размещения устройств компенсации реактивной мощности в энергосистеме. Полученное множество недоминируемых решений впоследствии используется для выбора наиболее подходящего к текущим условиям варианта;

5. Предложен новый специализированный алгоритм оптимизации на основе эволюционных стратегий. Разработано специализированное

формализованное описание параметров системы (принципы кодировки решений), принципы реализации эволюционных операторов (случайного изменения, рекомбинации решений, отбора) для применения в предложенном алгоритме. Разработанный алгоритм применен при решении задачи оптимального размещения устройств компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения города.

РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Лоскутов А.Б. Многоцелевая оптимизация компенсации реактивной мощности в электрических сетях / А.Б. Лоскутов, О.И. Ерёмин // Промышленная энергетика, 2006. – № 6. – С. 39 - 41.

Статьи, опубликованные в других изданиях:

2. Ерёмин О.И. Многоцелевой подход к задаче оптимизации размещения устройств компенсации реактивной мощности // III Международная молодежная научно-техническая конференция "Будущее технической науки": Тез. докл. – Н. Новгород, 2004. – С. 125 - 126.

3. Ерёмин О.И. Эволюционные алгоритмы в многоцелевой оптимизации размещения устройств компенсации реактивной мощности // XII Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых "Современные техника и технологии": Тез. докл. – Томск, 2006. – С. 20 - 21.

4. Ерёмин О.И. Целевые функции в задаче оптимального размещения устройств компенсации реактивной мощности // XII Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых "Современные техника и технологии": Тез. докл. – Томск, 2006. – С. 22 - 24.

5. Лоскутов А.Б. Многоцелевой подход к задаче оптимизации размещения устройств компенсации реактивной мощности / А.Б. Лоскутов, О.И. Ерёмин // V Международная молодежная научно-техническая конференция "Будущее технической науки": Тез. докл. – Н. Новгород, 2006. – С. 62 - 63.

6. Ерёмин О.И. Многоцелевая оптимизация в задаче компенсации реактивной мощности в электрических сетях // Ежегодная научно-практическая конференция "Нижегородская сессия молодых ученых": Тез. докл. – Н. Новгород, 2006. – С. 62 - 63.

7. Лоскутов А.Б. Многоцелевая оптимизация компенсации реактивной мощности в электрических сетях / А.Б. Лоскутов, О.И. Ерёмин // Энергоэффективность, 2006. №1-2.

Личный вклад автора. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежат: постановка задачи исследования и математический подход [1, 5], аналитический обзор [6].