

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования

**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)**

Факультет энергетический

Кафедра энергетики

Направление подготовки 13.04.02 - Электроэнергетика и электротехника

Направленность (профиль) образовательной программы

Электроэнергетические системы и сети

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зав. кафедрой

Н.В. Савина

« ____ » _____ 2023г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему: Инновационные подходы к проектированию распределительных электрических сетей

Исполнитель

студент группы 142-ом

подпись, дата

Не Цзясинь

Руководитель

профессор, докт. техн.
наук

подпись, дата

Ю.В.Мясоедов

Руководитель

научного содержания
программы магистратуры
профессор, докт. техн.
наук

подпись, дата

Н.В. Савина

Нормоконтроль

старший преподаватель

подпись, дата

Л.А. Мясоедова

Рецензент

подпись, дата

Благовещенск 2023

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет энергетический
Кафедра энергетики

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

_____ Н.В. Савина

«_____» _____ 2023 г.

З А Д А Н И Е

К выпускной квалификационной работе студента Не Цзясинь

1. Тема выпускной квалификационной работы:

Инновационные подходы к проектированию распределительных электрических сетей

(утверждено приказом от 21.02.2023 № 142-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы (проекта) _____

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: _____

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): _____

5. Перечень материалов приложения: (наличие чертежей, таблиц, графиков, схем, программных продуктов, иллюстративного материала и т.п.) _____

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе (с указанием относящихся к ним разделов) _____

7. Дата выдачи задания 22.02.2023

Руководитель выпускной квалификационной работы: Юрий Викторович Мясоедов, зав. кафедрой энергетики, профессор, доктор технических наук

(фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень, ученое звание)

Задание принял к исполнению (дата): 22.02.2023

(подпись студента)

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит 106 с., 7 рисунка, 7 таблиц, 57 источников, 1 приложения.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАССМАТРИВАЕМОГО РАЙОНА, АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ, ИННОВАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ, ОПТИМИЗАЦИЯ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ

В этой статье основное внимание уделяется проблемам неудовлетворительного качества напряжения, больших потерь в электросети и низкого коэффициента мощности местной сети электроснабжения, а также улучшению качества электроснабжения всей региональной энергосистемы за счет оптимизации конфигурации реактивной мощности. На основе анализа и исследований с целью снижения потерь в системной сети и улучшения качества напряжения электросети предложена математическая модель и метод ее решения, пригодные для оптимизации реактивной мощности распределительной сети в этой области, чтобы рассчитать оптимальное положение источника реактивной мощности и оптимальную мощность компенсации реактивной мощности, чтобы повысить безопасность и экономичность эксплуатации распределительной сети в регионе.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Современное состояние объекта исследования	9
1.1 Региональный обзор и экономическое развитие	9
1.2 Современное состояние товаропроводящей сети	10
1.3 Региональный обзор и экономическое развитие	14
2 Современное состояние исследований по оптимизации реактивной мощности	18
2.1 Предыстория и значение исследования	18
2.2 Состояние исследований в области оптимизации реактивной мощности	22
2.3 Необходимость оптимизации реактивной мощности распределительных сетей	25
2.3.1 Взаимосвязь между реактивной мощностью и потерями напряжения	25
2.3.2 Взаимосвязь между реактивной мощностью и активными потерями в сети	28
2.3.3 Взаимосвязь между реактивной мощностью и коэффициентом мощности	31
2.4 Роль оптимизации реактивной мощности	33
2.5 Принцип оптимизации реактивной мощности	34
3 Определение местоположения компенсации реактивной мощности и компенсационной емкости	37
3.1 Основные средства компенсации реактивной мощности	37
3.2 Реализация метода компенсации реактивной мощности	38
3.3 Традиционные методы оптимизации	41
3.4 Основные средства компенсации реактивной мощности	45
4 Обзор генетических алгоритмов	50
4.1 Основные принципы и обзор генетических алгоритмов	50

4.1.1	Возникновение и развитие генетических алгоритмов	50
4.1.2	Генетические алгоритмы и естественный отбор	52
4.1.3	Основной термин для генетических алгоритмов	53
4.1.4	Особенности генетических алгоритмов	55
4.1.5	Запущенный процесс генетического алгоритма	57
4.2	Схема оптимизации реактивной мощности распределительной сети на основе генетического алгоритма	63
5	Анализ оптимизации реактивной мощности подстанции No I и ее распределительной сети	67
5.1	Вычислительный анализ метода Ньютона-Рафтсона	67
5.1.1	Основное содержание закона Ньютона-Рафтсона	67
5.1.2	Расчеты по методу Ньютона-Рафтсона в виде прямых координат	72
5.1.3	Расчет течения по методу Ньютона-Рафтсона в виде полярных координат	77
5.1.4	Усовершенствования метода Ньютона-Рафтсона	79
5.2	Определение методов компенсации реактивной мощности и выбор местоположения	80
5.3	Параметры оптимизации реактивной мощности	82
5.3.1	Структурный анализ эквивалента сети	82
5.3.2	Выполняемый процесс	84
5.4	Анализ процесса оптимизации реактивной мощности и результатов на основе генетического алгоритма	87
	Заключение	94
	Библиографический список	96
	Приложение А Программа оптимизации реактивной мощности на основе генетического алгоритма	103

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВЛ – воздушная линия

ЗРУ – закрытое распределительное устройство

КЗ – короткое замыкание

КЛ – кабельная линия

ОПН – ограничитель перенапряжения

ОПУ - общеподстанционный пункт управления

ОРУ – открытое распределительное устройство

ПС – подстанция

СН – собственные нужды

СТ – силовой трансформатор

ВВЕДЕНИЕ

С непрерывным развитием электроэнергетики структура электросети имеет определенный масштаб. Распределительная сеть является основным компонентом энергосистемы, который непосредственно ориентирован на потребителя и предъявляет высокие требования к надежности и качеству напряжения системы. Поэтому то, как использовать новые технологии и новые методы для оптимизации системы, дальнейшего снижения потерь, повышения квалификации напряжения и повышения экономичности эксплуатации распределительной сети, имеет большое практическое значение.

В данной работе проанализированы географическое положение, климатическая среда, условия эксплуатации и основные параметры подстанции I и ее распределительной сети. Инновационная конструкция региона с использованием оптимизации реактивной мощности для снижения сетевых потерь в его распределительной сети и повышения выхода напряжения. По эксплуатационным характеристикам энергосистемы данного региона в качестве метода расчета перетока мощности энергосистемы в данном регионе был выбран метод Ньютона-Рафтсона и создана математическая модель оптимизации реактивной мощности энергосистемы. Благодаря анализу и изучению традиционных методов оптимизации и интеллектуальных методов оптимизации реактивной мощности электрических сетей. Генетический алгоритм был выбран в качестве метода решения оптимизации реактивной мощности распределительной сети. В этой статье представлены предпосылки и значение исследований в области оптимизации реактивной мощности, определено положение и возможности компенсации реактивной мощности, проанализированы и изучены традиционные методы оптимизации и методы искусственного интеллекта, а также дан базовый обзор генетических алгоритмов.

Основываясь на приведенной выше теории, подстанция No I и ее распределительная сеть инновационно спроектированы, а оптимальная точка

компенсации и оптимальная компенсационная емкость рассчитаны, чтобы улучшить уровень напряжения и распределение реактивной мощности в электросети, повысить экономичность и надежность работы электросети, улучшить качество электроснабжения и уменьшить потери в сети.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Региональный обзор и экономическое развитие

Общая площадь района составляет 127,6 квадратных километров, общая численность населения — 442000 человек, а общее количество домашних хозяйств — 80903. Рельеф всего региона равнинный, он относится к субтропическому влажному муссонному климату, который характеризуется четырьмя четко выраженными сезонами, достаточным количеством солнечного света, обильными осадками и длительным безморозным периодом. Среднегодовая температура составляет 17,6 °С, со средней температурой 5,1 °С в январе и 29,6 °С в июле. Вегетационный период в среднем составляет 246 дней в году. Безморозный период составляет в среднем 280 дней в году, максимум 330 дней и самый короткий 250 дней. Среднегодовое количество солнечных часов составляет 1875 часов, а общее годовое излучение составляет 116,45 ккал/квадратный сантиметр. Среднегодовое количество осадков составляет 1522 мм. Среднее количество дождливых дней в году составляет 144 дня, а осадки сконцентрированы с апреля по июнь каждого года, причем июнь является самым высоким.

Этот район представляет собой сочетание городских и сельских районов с множеством озер и прекрасной экологической средой, а также университетами, научно-исследовательскими подразделениями, крупными и средними предприятиями и национальными зонами развития высоких технологий, распределенными в юрисдикции, что представляет собой сильную экономическую поддержку. Минеральные ресурсы в этом районе относительно просты, только кирпичная глина, речной песок, галька, гранитный гнейс, цементная глина и т. д., с запасами от 50 до 100 миллионов тонн.

В 2021 году ВВП района составил 61,176 млрд юаней, что на 8,8% больше, чем в 2020 году, в сопоставимых ценах. Среди них добавленная стоимость первичной промышленности составила 33 млн юаней,

увеличившись на 6,3%; добавленная стоимость вторичной промышленности составила 40,62 млрд юаней, увеличившись на 7,8%; Добавленная стоимость третичной промышленности составила 20,523 млрд юаней, увеличившись на 10,6%. Структура третичной промышленности: 0,05:66,40:33,55. Среди ВВП региона добавленная стоимость негосударственной экономики достигла 45,741 млрд юаней, увеличившись на 10,7%.

В 2021 году доходы местного общего государственного бюджета района достигли 1,591 млрд юаней, увеличившись на 7,6% по сравнению с 2020 годом; Расходы местного государственного бюджета составили 3,29 млрд юаней, увеличившись на 9%. Налоговые поступления составили 72,7% доходов местного общегосударственного бюджета. Инвестиции в основной капитал на сумму более 5 млн юаней увеличились на 14,5% по сравнению с 2020 годом. Среди них инвестиции в промышленность увеличились на 32,3%, а инвестиции в развитие недвижимости увеличились на 35,9%. Торговая площадь коммерческого жилья составила 435 000 квадратных метров, увеличившись на 19,8%. В регионе насчитывается 147 проектов на сумму более 50 миллионов юаней, а завершённые инвестиции составляют 49,6% от общего объема инвестиций. Среди них было начато 64 новых проекта, а завершённые инвестиции составили 25,5% от инвестиций в проект в размере 50 миллионов юаней. Располагаемый доход городских жителей на душу населения составил 50 800 юаней, увеличившись на 7,3% по сравнению с 2020 годом; Расходы на проживание на душу населения составили 32 600 юаней, увеличившись на 10%. располагаемый доход на душу населения сельских жителей составил 25 900 юаней, увеличившись на 9,2%; Расходы на проживание на душу населения составили 17 300 юаней, увеличившись на 15,7%.

1.2 Современное состояние товаропроводящей сети

С быстрым развитием национальной экономики Китая, как пионера в социальном развитии, энергетическая отрасль также активно способствует реализации таких мер, как энергосбережение и сокращение потерь.

Распределительные сети играют важную роль в энергосистемах. Он связывает производство электроэнергии, распределение, потребление электроэнергии и т. Д.

Таблица 1 — Электроснабжение и потребление электроэнергии в районе с 2008г.~2015г.

год	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Среднегодовые темпы роста %
Потребление электроэнергии в обществе в целом	0.99	1.37	1.67	2.03	2.74	3.36	4.19	5.23	25.0
Первичная промышленность	0.16	0.14	0.26	0.25	0.20	0.11	0.09	0.11	-1.0
Вторичная промышленность	0.87	1.10	1.20	1.71	2.19	2.64	3.11	3.49	28.3
Третичная промышленность	0.14	0.15	0.26	0.20	0.20	0.32	0.32	0.35	14.9
Годовой темп роста	38.4	21.9	21.6	35.0	22.6	11.0	17.7	19.1	0.3
Потребление электроэнергии в жилых помещениях	0.20	0.28	0.31	0.58	0.58	0.66	0.89	1.28	31.3
Среднестатистическое домашнее хозяйство пользуется электричеством (kWh)	887	967	1087	1187	1237	1307	1351	1380	6.9

Распределительная сеть состоит из воздушных линий, кабелей, опор, распределительных трансформаторов, разъединителей, компенсаторов реактивной мощности и некоторых вспомогательных объектов, которые играют важную роль в распределении электрической энергии в электросети.

Благодаря преобразованию энергосистемы мощность электроснабжения и уровень управления всем регионом претерпели серьезные изменения, а региональная энергетическая инфраструктура была значительно улучшена, создав хорошие условия для экономического и социального развития, экономического развития и социалистической модернизации всего региона. Основные изменения заключаются в следующем[16]:

1. Компоновка электросети, как правило, разумна, а мощность и надежность электроснабжения значительно улучшены. Комплексная реализация «электроэнергии для домашних хозяйств» в основном удовлетворила местные потребности в электроэнергии для промышленного и сельскохозяйственного производства и проживания. В 2015 году по сравнению с 2007 годом отпуск электроэнергии увеличился с 70 млн. кВт·ч до 523 млн. кВт·ч, увеличившись на 647%; Региональная квалификационная ставка напряжения была увеличена с 85% до более чем 96%, а надежность электроснабжения была увеличена с 90% до более чем 99,4%. Мощность производства электроэнергии и качество энергосистемы были значительно улучшены, потенциальные угрозы безопасности были значительно снижены, а уровень аварийности был значительно снижен[1, 2].

2. Достичь цели равной цены потребления электроэнергии в городских и сельских домохозяйствах в одной сети и добиться замечательных результатов в поддержке сельского хозяйства и принести пользу фермерам. В 2015 году, по сравнению с 2005 годом, цена на электроэнергию для сельских домохозяйств снизилась в среднем с 1 юаня за кВтч до 0,6 юаня за кВтч. Цены на электроэнергию в сельской местности были значительно снижены, что фактически снизило нагрузку на электроэнергию, используемую фермерами, со среднегодовым снижением более чем на 4 миллиона юаней.

3. Стимулирование регионального потребления энергии и содействие региональному экономическому развитию. Снижение цен на электроэнергию, повышение мощности энергоснабжения и повышение качества энергоснабжения сыграли положительную роль в сотрудничестве с основной национальной политикой государства и инициировании регионального потребительского рынка.

4. Уменьшите потери мощности, больше энергосбережения и сокращения выбросов. В 2010 году, по сравнению с 1998 годом, общий уровень потерь в линиях снизился с 13,7% до примерно 6,1%, сэкономив 105 млн кВтч электроэнергии, сократив выбросы углекислого газа на 61 500 тонн и выбросы диоксида серы на 50,45 тонны.

Таблица 2 Состояние подстанций в районе в 2015 году

номер	Название подстанции	Уровень напряжения (кV)	Количество основных вариантов	Общая вместимость (MVA)	Время ввода в эксплуатацию
1	Подстанция I	35	2	20	2001
2	Подстанция II	110	2	80	2005
3	Подстанция III	110	1	40	2007

В настоящее время энергоснабжающая компания района имеет в своем ведении 2 подстанции 110 кВ и 3 главных трансформатора общей мощностью 120 МВА; 1 подстанция 35 кВ, 2 главных трансформатора общей мощностью 20 МВА; Имеется 3 линии 110 кВ общей протяженностью 15,9 км; 46 распределительных линий 10 кВ общей протяженностью 464,25 км; 2058 распределительных трансформаторов общей мощностью 5200995 кВА, в том числе 739 трансформаторов общего пользования общей мощностью 207515

кВА; 1319 специальных трансформаторов общей мощностью 313480 кВА; и 926,54 км низковольтных линий.

В данной работе в основном анализируется подстанция No I и ее распределительная сеть

1.3 Региональный обзор и экономическое развитие

Подстанция была построена в 1990 году и разделена на открытую зону высокого напряжения 35 кВ и крытую зону высокого напряжения 10 кВ, которая питается от линии электропередачи 35 кВ подстанции 110 кВ. Структурная схема станционной системы представлена на рисунке 1.

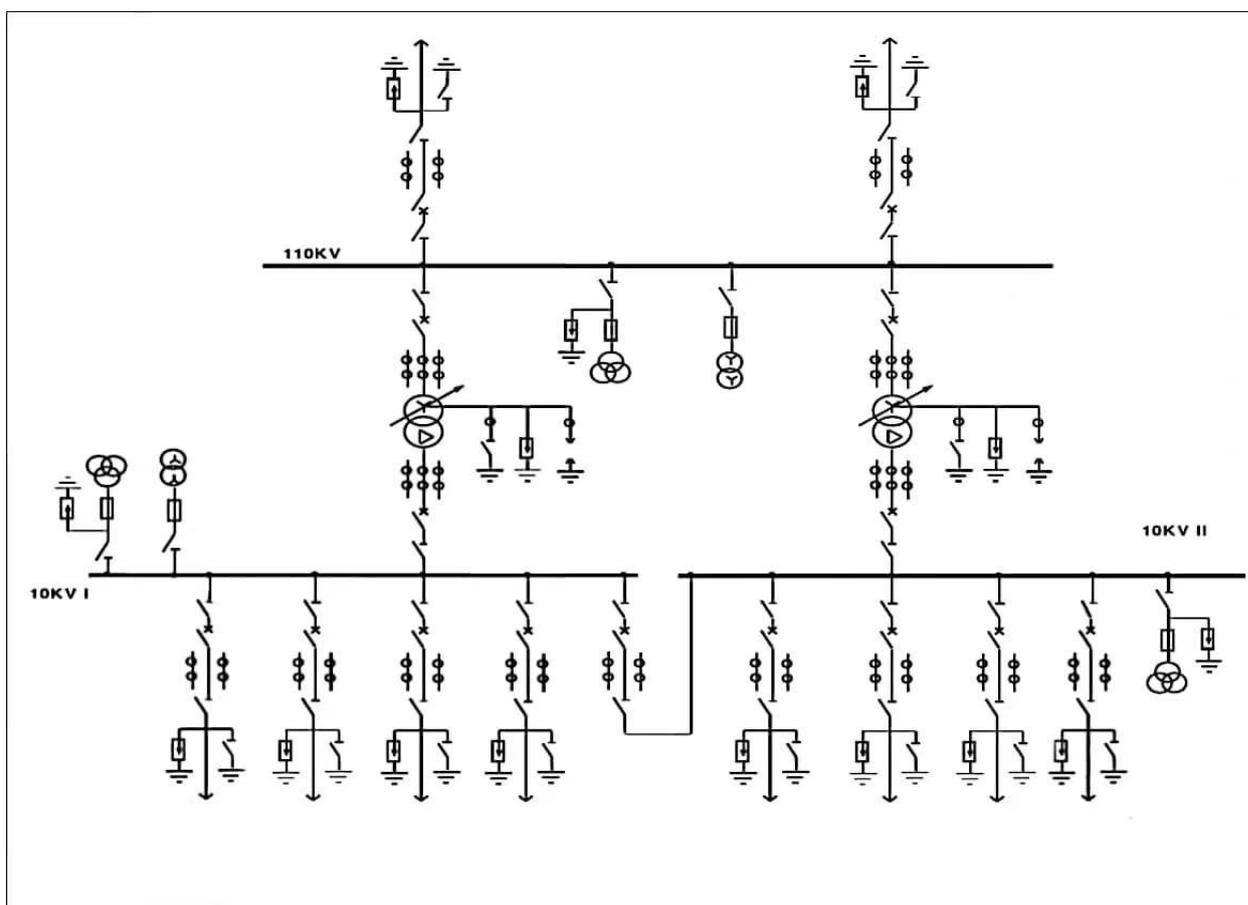


Рис 1 Структурная схема системы

Для удобства расчета приведенные выше упрощенные системные результаты показаны на рисунке 2:

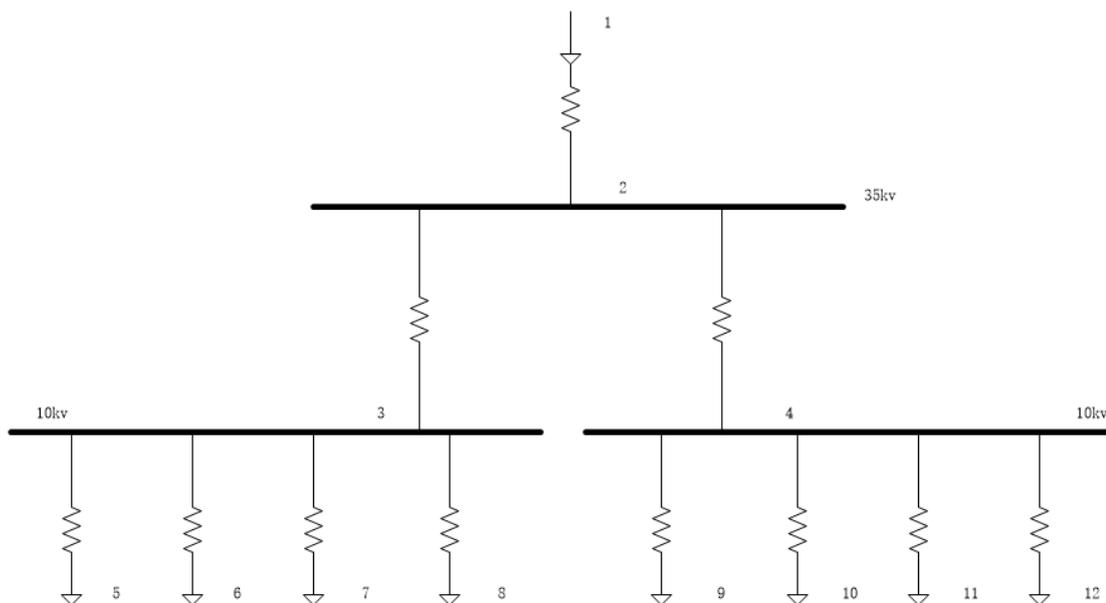


Рисунок 2 Упрощенная схема строения системы

Данные линий No2~7, входящих в состав ПС No1, приведены в таблице 3 за декабрь 2015 года

Таблица 3 Параметры линии

Название строки	6	7	8	9	10	11
Активная нагрузка (кВт)	320	350	150	250	490	150
Реактивная нагрузка (кVar)	200	180	90	110	240	95
Напряжение узла (pu)	0.901	0.916	0.899	0.926	0.970	0.908
Фактор силы	0.84	0.88	0.86	0.92	0.90	0.85
Первая конечная точка линии	9	9	9	10	10	10
Конечная точка линии	4	3	2	5	6	7
Значение сопротивления ветвей (Ω)	0.1052	0.0305	0.0017	0.3100	0.0410	0.0092

Значение реактивного сопротивления ветвей (Ω)	0.1229	0.0356	0.0020	0.3624	0.0477	0.0117
--	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Средний коэффициент мощности шины 10 кВ на подстанции 110 кВ остается около 0,97 ~ 0,98, а квалификационный коэффициент напряжения класса А составляет 99,2%. Средний коэффициент мощности фидерной розетки 10 кВ составляет около 0,92, из которых коэффициент мощности 9-проводных, 6-проводных и других линий низкий, все ниже 0,91. Общий коэффициент квалификации напряжения класса D поддерживается на уровне около 97%, из которых коэффициент квалификации напряжения 6-проводных и 10-проводных линий низкий, оба ниже 96%.

В последние годы, благодаря усилению управления, округ достиг некоторых результатов в улучшении качества электроэнергии и строительстве компенсации реактивной мощности, в основном выполняя показатели, требуемые вышестоящим отделом для улучшения, но из-за очевидных сезонных изменений нагрузки, больших изменений дневной и ночной нагрузки, ограниченных средств контроля реактивной мощности напряжения, недостаточной мощности, и район в настоящее время реализует только мониторинг реактивной мощности напряжения на уровне подстанции, реактивная мощность напряжения распределительной линии не достигла удаленного мониторинга, эффект компенсации реактивной мощности не может достичь лучшего персонала, и персонал не может понять состояние работы реактивной мощности напряжения в режиме реального времени. Средства анализа недостаточно глубоки, и все еще существует определенный пробел в использовании компенсации реактивной мощности для достижения энергосбережения и снижения потерь[12].

В этой статье основное внимание уделяется проблемам неудовлетворительного качества напряжения, больших потерь в электросети и низкого коэффициента мощности местной сети электроснабжения, а также улучшению качества электроснабжения всей региональной энергосистемы за счет оптимизации конфигурации реактивной мощности. На основе анализа и исследований с целью снижения потерь в системной сети и улучшения качества напряжения электросети предложена математическая модель и метод ее решения, пригодные для оптимизации реактивной мощности распределительной сети в этой области, чтобы рассчитать оптимальное положение источника реактивной мощности и оптимальную мощность компенсации реактивной мощности, чтобы повысить безопасность и экономичность эксплуатации распределительной сети в регионе.

2 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОПТИМИЗАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

2.1 Предыстория и значение исследования

С быстрым развитием национальной экономики Китая и международной энергетической ситуацией экономическая эксплуатация энергосистемы становится все более важной. На то, как оптимизировать распределение системных ресурсов, обеспечить надежную и безопасную работу системы и в то же время снизить эксплуатационные потери, улучшить качество электроэнергии, улучшить корпоративные и социальные льготы и т. д., люди уделяют все больше внимания[4, 12].

Распределительная сеть находится в конце энергосистемы и напрямую связана с пользователем, а уровень энергопотребления пользовательской стороны напрямую зависит от надежности электроснабжения и качества электроснабжения распределительной сети. Статистические результаты показывают, что основной причиной отключения электроэнергии большинства пользователей является недостаточная надежность электроснабжения системы распределения электроэнергии. Точно так же низкое качество напряжения распределительной системы также является одним из важных факторов для низкого уровня квалификации напряжения большинства городских электрических сетей.

Исследования показали, что процесс распределения электроэнергии приводит к тому, что не менее 10% электроэнергии тратится впустую. Внутренняя распределительная сеть Китая разделена на три уровня: высокое напряжение (220 кВ и выше), среднее напряжение (от 35 кВ до 110 кВ) и низкое напряжение (10 кВ), а коэффициент потерь в сети высокого, среднего и низкого напряжения составляет около 1,5: 1,1: 2,5. Видно, что на низковольтную распределительную сеть приходится подавляющее большинство общих потерь распределительной сети.

С этой целью энергетики выдвигают множество мер по снижению потерь в системной сети и улучшению качества электроэнергии, таких как: трансформация существующей структуры распределительной системы предприятий, разумный выбор мощности оборудования электроснабжения, обновление или преобразование существующего оборудования с малой мощностью и большим энергопотреблением, рациональная настройка устройств компенсации реактивной мощности, снижение потока реактивной мощности на линии, снижение потерь в сети, улучшение коэффициентов мощности. Среди них управление оптимизацией реактивной мощности является наиболее практичной мерой[2, 12, 18].

На протяжении многих лет электроэнергетика Китая всегда основывалась на производстве электроэнергии, игнорируя энергоснабжение, распределение и энергопотребление. Это проявляется в двух аспектах: во-первых, с точки зрения понимания, Китай долгое время фокусировался на исследованиях активной мощности, игнорировал реактивную мощность и не смог достичь глубокого понимания роли и планирования реактивной мощности. Во-вторых, с точки зрения инвестиций, инвестиции Китая в бизнес по распределению электроэнергии составляют лишь одну десятую от инвестиций в бизнес по производству и передаче электроэнергии, а система распределения электроэнергии не была полностью улучшена. Кроме того, меры регулирования не идеальны, потому что распределительная сеть охватывает обширную территорию, а пользователи в основном являются небольшими жителями, поэтому их не воспринимают всерьез, техническая поддержка отсутствует, а средства управления реактивной мощностью не совершенны. В результате распределение потока реактивной мощности в распределительной сети происходит неравномерно, потери в сети высоки, а качество электроснабжения не может быть гарантировано, что влияет на его безопасную и стабильную работу и экономические выгоды[13].

Как избыток, так и дефицит реактивной мощности могут негативно сказаться на энергосистеме. Избыточная реактивная мощность сделает

напряжение слишком высоким, поставит под угрозу безопасность системы и оборудования и приведет к пустой трате ресурсов из-за повторных инвестиций. И когда реактивная мощность недостаточна, если система использует только выходную реактивную мощность мощности генератора для балансировки реактивной мощности всей системы, где реактивная мощность недостаточна, необходимо передавать реактивную мощность на большое расстояние линии, с одной стороны, уровень напряжения будет низким, некоторые заводы и бытовые приборы не могут нормально работать, с другой стороны, как только система будет нарушена, это может сделать напряжение ниже критического напряжения, что приведет к коллапсу напряжения, что приведет к катастрофической аварии, при которой система рухнет из-за потери синхронизации. Например, отключение электроэнергии во Франции 19 декабря 1978 г., отключение электроэнергии в Швеции 27 декабря 1983 г. и отключение электроэнергии в Токио 23 июля 1987 г. были вызваны коллапсом напряжения, вызванным недостаточной реактивной мощностью из-за пиковых нагрузок, что привело к крупным системным авариям. Кроме того, необоснованный поток реактивной мощности в системе увеличит падение напряжения линии, увеличит потери линии и снизит экономичность электроснабжения[3].

В настоящее время применение оптимизации реактивной мощности в высоковольтной сети электропередачи Китая также достигло определенных результатов, и все еще существуют очевидные недостатки в исследовании распределительной сети, что показывает очень актуальную проблему с точки зрения состояния исследований и фактической эксплуатации. В результате реализации национального проекта трансформации двух сетей появились на свет системы автоматизации, оборудование и сооружения распределительных сетей, которые обеспечили более благоприятные объективные условия для оптимального управления реактивной мощностью в распределительной сети. Исследования надежности, связанные с повышением надежности электроснабжения, перешли к изучению улучшения экономической

эксплуатации распределительной сети, то есть того, как рационально использовать и распределять реактивные ресурсы, еще больше снижать потери распределительной сети и улучшать качество напряжения. Существующая установленная мощность Китая превысила 200 миллионов киловатт, и каждое снижение потерь в сети на 0,1% эквивалентно экономии 200 000 киловатт тепловых электростанций, а общая стоимость строительства 200 000 киловатт тепловых электростанций составляет около 1,5 миллиарда юаней. При этом ежегодно сжигается около 600 000 тонн угля. Если электросеть компенсируется устройствами компенсации реактивной мощности, такими как силовые конденсаторы, стоимость снижения потерь в той же электросети составляет всего 20% ~ 25% от стоимости строительства электрической тепловой электростанции. Поэтому исследования по оптимизации реактивной мощности распределительной сети имеют важное практическое значение и целесообразность[57].

Короче говоря, разумное распределение реактивной мощности в сети, снижение потока реактивной мощности в линии, разумное распределение тока реактивной мощности может эффективно улучшить качество напряжения электропитания, уменьшить потери в сети и, таким образом, улучшить экономичность, безопасность и стабильность электроэнергетики. Работоспособность системы также может принести огромную социальную пользу.

Так называемая оптимизация реактивной мощности энергосистемы основана на прогнозировании нагрузки и планировании сети на основе обеспечения безопасности и надежности системного электроснабжения и хорошего качества электроэнергии за счет оптимизации алгоритма оптимизации, разумного расположения и оптимизации мощности реактивной мощности для реализации стратегии регулировки положения оборудования для компенсации мощности и трансформаторного отвода для достижения экономической оптимизации работы системы, что является целью и средством оптимизации реактивной мощности распределительной сети. То есть, когда

структурные параметры и условия нагрузки системы задаются путем оптимизации определенных управляющих переменных при условии соблюдения заданных ограничений, один или несколько показателей производительности системы достигают оптимальных средств регулировки реактивной мощности. Это также эффективное средство обеспечения безопасности и экономичной эксплуатации системы, а также одна из важных мер по улучшению качества напряжения энергосистемы[56, 58].

Следовательно, важность изучения оптимизации реактивной мощности энергосистемы заключается в эффективном поддержании уровня напряжения системы за счет разумного распределения потока реактивной мощности, улучшении стабильности напряжения в системе и снижении активных потерь в сети.

Благодаря оптимальной конфигурации и диспетчеризации реактивной мощности энергосистемы он может не только поддерживать уровень напряжения и повышать стабильность работы энергосистемы, снижать потери в активной сети и потери в сети реактивной мощности, но также быть незаменимым инструментом для руководства диспетчерами для организации режима работы и планирования оптимизации реактивной мощности электросети. Оптимизация реактивной мощности имеет важное практическое значение и значительные экономические выгоды для экономии электроэнергии, улучшения качества напряжения и повышения надежности работы электросети.

2.2 Состояние исследований в области оптимизации реактивной мощности

Оптимизация реактивной мощности является классической проблемой энергосистемы, и целью является применение методов математической оптимизации для научного и обоснованного распределения средств регулирования реактивной мощности для удовлетворения показателей безопасности и экономических показателей эксплуатации электрических сетей. На протяжении многих лет многие ученые использовали различные

методы оптимизации и в сочетании с реальной ситуацией в энергосистеме проводили обширные исследования по этой проблеме и достигли большого количества ценных результатов исследований. Оптимизация реактивной мощности математически анализируется как сложная смешанная целочисленная задача программирования, содержащая большое количество дискретных переменных, непрерывных переменных и нелинейных функций; В практическом смысле он имеет два разных типа переменных и ограничений для инвестирования и работы. В настоящее время исследования оптимизации реактивной мощности в основном сосредоточены на двух аспектах [15, 17, 22, 50] :

1) Построение математических моделей. Модель должна максимально отражать фактическую ситуацию в системе, то есть целевая функция и различные ограничения близки к работе энергосистемы, такие как учет стабильности напряжения, нескольких рабочих состояний, учет планирования инвестиций, долгосрочная модель планирования реактивной мощности и т. д.

2) Исследование методов оптимизации. Проблемы, возникающие в процессе решения, улучшены, такие как длительное время решения, простота получения локального оптимального решения и «размерная катастрофа», а также предложены различные методы решения.

Эти алгоритмы можно разделить на две категории: классические алгоритмы оптимизации реактивной мощности и алгоритмы искусственного интеллекта[5, 7].

Классический алгоритм оптимизации реактивной мощности начинается с некоторой начальной точки, непрерывно совершенствует текущее решение по определенной траектории и, наконец, сходится к оптимальному решению. К таким методам оптимизации в основном относятся линейное программирование, нелинейное программирование, смешанное целочисленное программирование, динамическое программирование и т.д. Этот тип метода прошел три этапа, первый из которых представляет собой критерий микроувеличения потерь в равной сети, основанный на функции

Лагранжа, который учитывает только ограничение уравнения, которое имеет четкую концепцию, является простым и быстрым и играет важную роль в планировании работы и формулировании режимов энергосистемы, особенно в принятии эмпирических решений; Во-вторых, это различные алгоритмы оптимизации, учитывающие ограничения неравенства, такие как алгоритм градиентных классов, метод линейного программирования, метод квадратичного программирования и метод смешанного целочисленного программирования. В-третьих, это алгоритмы функций препятствий, такие как метод внутренней точки, который имеет особые преимущества, такие как скорость вычислений, не сильно связанная с масштабом решения, поэтому он стал горячей точкой в области оптимизационных исследований.

Алгоритм искусственного интеллекта — это алгоритм, построенный на определенной интуитивной основе. В последние годы внимание людей привлекло применение интеллектуальных алгоритмов, вдохновленных эффективными аналогиями между природой и человеком в оптимизации реактивной мощности, включая искусственные нейронные сети, алгоритмы роя частиц, методы имитации отжига, генетические алгоритмы и т. д. Интеллектуальные методы — это методы, которые могут быть оптимизированы без аналитических выражений, включая серию алгоритмов поисковой оптимизации с разной степенью интеллекта. Они начинают с исходной группы решений и ищут оптимальное решение определенным образом, следуя принципу переноса вероятностей. Интеллектуальный алгоритм поиска, представленный генетическим алгоритмом и методом имитации отжига, в принципе не нуждается в каких-либо ограничительных допущениях для пространства поиска, поэтому он обладает способностью глобальной оптимизации, которая компенсирует недостатки традиционных методов математического программирования и успешно применяется при оптимизации реактивной мощности энергосистемы.

2.3 Необходимость оптимизации реактивной мощности распределительных сетей

2.3.1 Взаимосвязь между реактивной мощностью и потерями напряжения

Качество напряжения является одним из важных показателей качества электроэнергии. Мера качества напряжения, как правило, заключается в том, чтобы определить, превышает ли смещение заданное значение. Как реактивные, так и активные нагрузки в распределительной сети изменяются случайным образом. В случае недостаточной или избыточной реактивной мощности в распределительной сети это вызовет отклонение напряжения, смещение частоты или мерцание колебаний, в результате чего активная мощность системы не может быть полностью использована, вызовет повышение напряжения, повлияет на электричество пользователя, повредит пользовательское оборудование, снизит качество продукции, серьезное падение напряжения может привести к коллапсу сети и крупномасштабным авариям с отключением электроэнергии, повлияет на безопасность эксплуатации системы и большинства силового оборудования пользователя, а также увеличит потери мощности.

Соотношение между реактивной мощностью и напряжением показано на рисунке 3

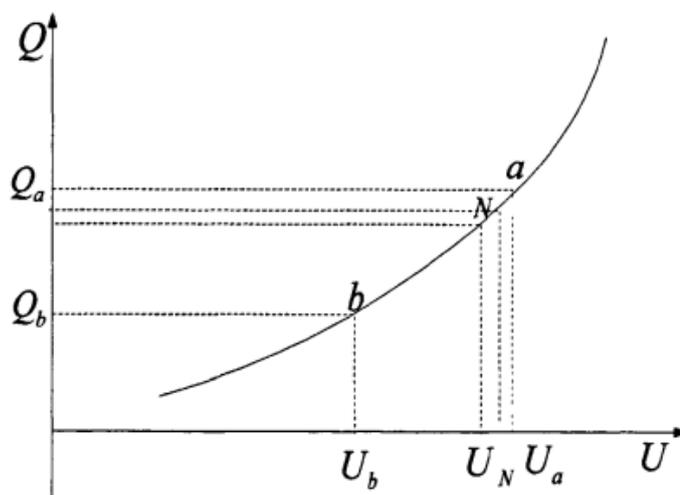


Рис 3 Соотношение между реактивной мощностью и напряжением

Как видно из рисунка 3, при достаточной реактивной мощности в системе (Q_a) уровень напряжения распределительной сети может поддерживаться вблизи допустимого диапазона номинального напряжения (U_a); Когда реактивная мощность в системе недостаточна (Q_b), напряжение распределительной сети будет вынуждено упасть до более низкого уровня напряжения для работы (U_b), отклониться от номинального напряжения системы и не сможет соответствовать требованиям качества напряжения. Поэтому для поддержания безопасной и стабильной работы распределительной сети необходимо иметь достаточный источник реактивной мощности и относительно стабильную емкость регулирования напряжения в сети. Короче говоря, уровень напряжения и реактивная мощность при работе распределительной сети взаимно ограничены и взаимозависимы.

Приблизительная формула расчета потери напряжения в сети:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U_N}, \quad (1)$$

где ΔU —потери напряжения в линии;

P —активная мощность, передаваемая по линии;

Q —реактивная мощность, передаваемая по линии;

R —Сопrotивление линии;

X —Реактивное сопротивление линии;

U_N —Номинальное напряжение линии;

Из уравнения (1) видно, что в структуре сети при определении параметров сети (сопротивление R и реактивное сопротивление X) потери напряжения пропорциональны активной мощности и реактивной мощности, передаваемой по линии. Когда активная мощность, передаваемая по линии, фиксирована, потери напряжения линии зависят от величины реактивной мощности, передаваемой линией. Если в линии передается слишком большая реактивная мощность, потери напряжения линии могут превысить

максимально допустимое значение, что приведет к низкому напряжению на стороне пользователя. Это основная причина оптимизации реактивной мощности распределительной сети.

Согласно уравнению (1), мы можем получить потери напряжения линии до компенсации (ΔU_1) и потери напряжения компенсированной линии (ΔU_2) :

$$\Delta U_1 = \frac{P_L R + Q_L X}{U_N} \quad (2)$$

$$\Delta U_2 = \frac{P_L R + (Q_L - Q_C) X}{U_N} \quad (3)$$

где P_L —Активная мощность нагрузки;

Q_L —Реактивная мощность нагрузки;

Q_C —Емкость параллельного компенсационного конденсатора;

U_N —Номинальное напряжение линии;

Из уравнений (2) и (3) потери напряжения, которые могут быть уменьшены линией, связаны с тем, что реактивная мощность компенсируется в линии

$$\Delta U_1 - \Delta U_2 = \frac{P_L R + Q_L X}{U_N} - \frac{P_L R + (Q_L - Q_C) X}{U_N} \quad (4)$$

$$\Delta U_1 - \Delta U_2 = \frac{P_L R + Q_L X}{U_N} - \frac{P_L R + (Q_L - Q_C) X}{U_N} \quad (5)$$

Формула расчета потерь напряжения трансформатора в основном такая же, как и формула расчета потерь напряжения линии, с той лишь разницей, что модель схемы замещения трансформатора имеет дополнительную ветвь возбуждения, чем модель схемы замещения линии.

Видно, что для обеспечения уровня напряжения распределительной сети и уменьшения отклонения напряжения и колебаний на стороне пользователя распределительная сеть должна иметь достаточный источник реактивной мощности и соответствующую регулируемую способность, поскольку большая часть электрооборудования спроектирована и изготовлена в соответствии с указанным номинальным напряжением, поэтому низкое напряжение оказывает очень большое влияние на электрооборудование, поэтому, если напряжение на клеммах электрооборудования на стороне пользователя значительно упадет, это приведет к повреждению электрооборудования, снижению качества продукции и снижению выходной мощности и другим проблемам. Резкое падение напряжения может привести к коллапсу сети и масштабным отключениям электроэнергии, что повлияет на безопасность эксплуатации системы и энергетического оборудования большинства пользователей и увеличит потери электроэнергии.

2.3.2 Взаимосвязь между реактивной мощностью и активными потерями в сети

Активные потери сети - это комплексный экономический и технический показатель, который в основном используется для измерения совершенства и уровня управления строительством распределительной сети. Распределение реактивной мощности, передача реактивной мощности и планирование реактивной мощности тесно связаны с активными потерями в сети[49].

Приблизительная формула расчета активного убытка линии:

$$\Delta P_L = \frac{P^2 + Q^2}{U_N^2} R \quad (6)$$

где ΔP_L — Потеря активной мощности линии;

P — Активная мощность, передаваемая по линии;

Q — Реактивная мощность, передаваемая по линии;

R — Сопротивление линии;

U_N —Номинальное напряжение линии;

Примерная формула расчета активных потерь трансформатора:

$$\Delta P_B = P_O + P_K \frac{P^2 + Q^2}{S_N^2} \quad (7)$$

где ΔP_B —Потери активной мощности трансформаторов;

P_O —Потери железа в трансформаторах;

P_K —Потери меди в трансформаторах;

S_N —Номинальная мощность трансформатора;

P —Активная мощность, передаваемая трансформатором;

Q —Реактивная мощность, передаваемая трансформатором;

Из уравнения (6) и уравнения (7) видно, что активные потери в распределительной сети равны сумме активных потерь всех трансформаторов в распределительной сети и активных потерь линии, а выражение выглядит следующим образом:

$$\Delta P = \Delta P_L + \Delta P_B = \frac{P^2 + Q^2}{U_N^2} R + P_O + P_K \frac{P^2 + Q^2}{S_N^2} \quad (8)$$

Из уравнения (8) видно, что чем выше напряжение при работе распределительной сети, тем меньше ток, передаваемый в сеть, и тем меньше соответствующие активные потери в сети. Когда активная мощность P и параметр R , передаваемые в распределительной сети, определены, чем меньше передаваемая реактивная мощность, тем меньше потери в активной сети. Видно, что поток реактивной мощности в распределительной сети является самой непосредственной причиной увеличения активных потерь в сети.

Активные потери в сети до компенсации реактивной мощности в распределительной сети (ΔP_1).

$$\Delta P_1 = \sum \left(\frac{P_L^2 + Q_L^2}{U_N^2} R \right) + \sum \left(P_O + P_K \frac{P_L^2 + Q_L^2}{S_N^2} \right) \quad (9)$$

Активные потери в сети после компенсации реактивной мощности в распределительной сети (ΔP_2)

$$\Delta P_2 = \sum \left(\frac{P_L^2 + (Q_L - Q_C)^2}{U_N^2} R \right) + \sum \left(P_O + P_K \frac{P_L^2 + (Q_L - Q_C)^2}{S_N^2} \right) \quad (10)$$

где ΔP_1 — Активные потери в сети до компенсации реактивной мощности;

ΔP_2 — Активные потери в сети после компенсации реактивной мощности;

P_L — Активная мощность нагрузки;

Q_L — Реактивная мощность нагрузки;

Q_C — Емкость параллельного компенсационного конденсатора;

Из уравнений (9) и (10) можно сделать вывод, что уменьшенные потери реактивной мощности в распределительной сети до и после добавления составляют:

$$\Delta P_1 - \Delta P_2 = \sum \left(\frac{Q_L^2 - (Q_L - Q_C)^2}{U_N^2} R \right) + \sum \left(\frac{Q_L^2 - (Q_L - Q_C)^2}{S_N^2} P_K \right) \quad (11)$$

Видно, что для того, чтобы уменьшить активные сетевые потери распределительной сети, необходимо сделать реактивный источник питания разумно распределенным и максимально уменьшить поток реактивной мощности в распределительной сети. Одним из основных способов экономии энергии в энергосистеме является разумная регулировка режима работы и обеспечение экономичной работы энергосистемы, а управление ее реактивной мощностью заключается в обеспечении стратификации реактивной мощности,

зонировании, своевременном балансе на месте, стараться избегать передачи реактивной мощности в разных местах, уменьшать потери в линии, обеспечивать стабильность напряжения и повышать эффективность электрооборудования, максимальная экономия энергии.

2.3.3 Взаимосвязь между реактивной мощностью и коэффициентом мощности

Коэффициент мощности является важным техническим показателем энергосистемы. Это мера эффективности электрооборудования. Низкий коэффициент мощности указывает на то, что реактивная мощность линии для преобразования переменного магнитного поля велика, что снижает коэффициент использования оборудования и увеличивает потери питания линии. В цепях переменного тока косинус разности фаз между напряжением и током называется коэффициентом мощности, представленным символом $\cos\varphi$, а численно коэффициент мощности представляет собой отношение активной мощности к полной мощности, т. е.:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (12)$$

где S, P, Q — Полная мощность, активная мощность, реактивная мощность

$\cos \varphi$ — Коэффициент мощности;

φ — Угол коэффициента мощности;

Первопричиной низкого коэффициента мощности является наличие индуктивных нагрузок. Например, наиболее распространенный асинхронный двигатель переменного тока в производстве обычно имеет коэффициент мощности 0,7-0,9 при номинальной нагрузке, а его коэффициент мощности ниже, если это небольшая нагрузка. Другое оборудование, такое как печи промышленной частоты, сварочные трансформаторы и люминесцентные лампы, имеют низкий коэффициент мощности нагрузки. Из степенного

треугольника и его взаимосвязи нетрудно заметить, что чем ниже коэффициент мощности (тем больше угол φ) при условии, что кажущаяся мощность неизменна, тем меньше активная мощность и тем больше реактивная мощность. Это приводит к тому, что мощность оборудования электроснабжения используется не полностью, например, трансформатор мощностью 1000 кВА, если $\cos\varphi = 1$, может передавать 1000 кВт активной мощности; При $\cos\varphi = 0,7$ может передаваться только 700 кВт активной мощности. Низкий коэффициент мощности не только снижает эффективную выходную мощность оборудования электроснабжения, но также увеличивает потери в оборудовании и линиях электроснабжения, поэтому необходимо принимать такие меры, как параллельные конденсаторы, для компенсации реактивной мощности для улучшения коэффициента мощности.

Согласно уравнению (12), коэффициент мощности ($\cos\varphi_1$) нагрузки до компенсации реактивной мощности распределительной сети равен

$$\cos\varphi_1 = \frac{P}{\sqrt{P_L^2 + Q_L^2}} \quad (13)$$

Коэффициент мощности нагрузки после компенсации реактивной мощности в распределительной сети равен ($\cos\varphi_2$).

$$\cos\varphi_2 = \frac{P}{\sqrt{P_L^2 + (Q_L - Q_C)^2}} \quad (14)$$

где P_L — Активная мощность нагрузки;

Q_L — Реактивная мощность нагрузки;

Из уравнений (13) и (14) можно сделать вывод, что коэффициент мощности нагрузки увеличивается до и после пополнения реактивной мощности распределительной сети:

$$\Delta \cos \varphi = \cos \varphi_1 - \cos \varphi_2 = \frac{P}{\sqrt{P_L^2 + Q_L^2}} - \frac{P}{\sqrt{P_L^2 + (Q_L - Q_C)^2}} \quad (15)$$

Следовательно, чтобы улучшить коэффициент мощности нагрузки, необходимо принять такие меры, как параллельные конденсаторы для компенсации реактивной мощности, чтобы улучшить использование оборудования и снизить потери в линии.

2.4 Роль оптимизации реактивной мощности

1. Увеличьте уровень напряжения

Если потребность в реактивной мощности изменится, это может привести к потерям напряжения, колебаниям уровня напряжения и повлиять на эффективность работы сети. Поэтому использование шунтирующих конденсаторов для регулировки напряжения распределительной сети может ограничить диапазон колебаний напряжения и поддерживать безопасную и стабильную работу системы. Оптимизация реактивной мощности является одной из основных мер контроля напряжения распределительной сети, которая может разумно контролировать распределение потока реактивной мощности в сети, снижать потери напряжения и улучшать качество напряжения на стороне пользователя. Среди них соотношение между амплитудой напряжения и компенсацией реактивной мощности выглядит следующим образом:

$$\Delta U = \frac{Q_C X}{U_N} \quad (16)$$

2. Улучшение коэффициента мощности

Там, где это уместно, коэффициент мощности должен быть увеличен за счет генерации реактивной мощности поблизости, тем самым уменьшая поток реактивной мощности в линиях передачи и распределения. Известно, что большинство промышленных и сельскохозяйственных нагрузок потребляют

реактивную мощность, поэтому текущее значение только выше активной мощности, а коэффициент мощности все еще отстает; Однако для обычных потребителей энергии увеличение потока нагрузки не имеет практического смысла, но возникающая в результате высокая пропускная способность и высокие потери энергии увеличивают сумму, уплачиваемую пользователем.

Кроме того, передача реактивной мощности на большие расстояния от генератора к нагрузке делает оборудование для производства и передачи электроэнергии неэффективным и в то же время увеличивает сложность управления напряжением в системе распределения электроэнергии. Таким образом, оптимизация реактивной мощности и разумный контроль спроса на реактивную мощность могут значительно улучшить коэффициент мощности и снизить потери в сети.

3. Сбалансируйте нагрузку на систему

Нагрузка энергосистемы, как правило, трехфазная сбалансированная, и работа в условиях несбалансированной нагрузки приведет к появлению токовых компонентов и гармоник отрицательной и нулевой последовательности, что приведет к пульсациям в выпрямителе, дополнительным потерям в двигателе и вибрационному моменту в двигателе переменного тока, что влияет на использование оборудования. Кроме того, в несбалансированных условиях некоторое оборудование, которое полагается на трехфазный баланс для устранения третьей гармоники, приведет к отказу оборудования из-за того, что третья гармоника не будет устранена. Большое практическое значение имеет оптимизация системы управления и балансировки реактивной мощности распределительной сети с трехфазной нагрузкой.

2.5 Принцип оптимизации реактивной мощности

1. Обеспечьте качество напряжения

Качество напряжения является одним из основных показателей для измерения качества электроэнергии. Поэтому для распределительной сети оптимизация реактивной мощности должна осуществляться при различных

нормальных условиях и режимах работы после аварии, чтобы напряжение каждого узла соответствовало заданным требованиям. Поддерживайте смещение напряжения в указанном диапазоне, чтобы обеспечить качество напряжения.

2. Лучшие экономические показатели

Помимо обеспечения безопасности общей эксплуатации распределительной сети, другой основной целью, которую преследует оптимизация реактивной мощности распределительной сети, является наилучший экономический результат. Передача активной мощности является основной задачей линии распределительной сети, однако большое количество потоков и передач реактивной мощности в электросети, что приведет к активным потерям, что приведет к падению напряжения, дальнейшему влиянию на качество электроэнергии, выработке электроэнергии, передаче, распределению будет иметь неблагоприятные последствия. Таким образом, активные потери линии, вызванные потоком реактивной мощности, сведены к минимуму.

3. Реактивный источник питания соответствует требованиям реактивной нагрузки

Аппаратура компенсации реактивной мощности, широко используемая в распределительных сетях, представляет собой шунтирующие конденсаторные батареи. Чтобы эффективно контролировать реактивную мощность в распределительной сети, потребность в реактивной мощности при нормальных уровнях напряжения должна быть удовлетворена.

4. Принять принцип зонирования, стратификации и местного баланса;

Конфигурация оборудования компенсации реактивной мощности должна реализовывать принципы иерархического разделения и балансировки на месте. Так называемое наслоение относится к электросети 200 ~ 500 кВ, которая в основном осуществляет активную передачу мощности, и баланс реактивной мощности между каждым уровнем напряжения должен поддерживаться как можно больше, чтобы уменьшить серию реактивной

мощности между каждым слоем напряжения; Так называемое зонирование относится к сети электроснабжения напряжением 110 кВ и ниже, и должно быть реализовано зонирование реактивной мощности и локальный баланс.

3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И КОМПЕНСАЦИОННОЙ ЕМКОСТИ

3.1 Основные средства компенсации реактивной мощности

1. Индивидуальная компенсация низкого напряжения

Индивидуальная компенсация низкого напряжения заключается в рассредоточении одной или нескольких низковольтных конденсаторных батарей параллельно с электрооборудованием в соответствии с потребностью в реактивной мощности отдельного электрооборудования, и она разделяет набор автоматических выключателей (т. е. переключателей) с электрооборудованием. Переключение двигателя осуществляется одновременно с помощью устройств управления и защиты. Случайная компенсация подходит для компенсации потребления реактивной мощности отдельных асинхронных двигателей большой и непрерывной мощности (таких как асинхронные двигатели большой и среднего размера), главным образом для компенсации реактивной мощности возбуждения[5].

Преимущество низковольтной индивидуальной компенсации заключается в том, что когда электрооборудование работает, вход компенсации реактивной мощности, когда электрооборудование не работает, компенсационное оборудование также выходит, поэтому это не вызовет реверсирования реактивной мощности. Он обладает такими преимуществами, как низкие инвестиции, небольшая занимаемая площадь, простота установки, удобная и гибкая конфигурация, простота обслуживания и низкий уровень аварийности.

2. Централизованная компенсация низкого напряжения

Низковольтная централизованная компенсация относится к низковольтному конденсатору, подключенному к низковольтной шине распределительного трансформатора через низковольтный переключатель, а коммутационное устройство компенсации реактивной мощности используется в качестве устройства защиты управления, а переключение

конденсатора напрямую контролируется в соответствии с реактивной нагрузкой на низковольтной шине. Переключение конденсатора осуществляется целой группой, и плавная регулировка невозможна.

Преимущества низковольтной централизованной компенсации: простая проводка, небольшая рабочая нагрузка на эксплуатацию и техническое обслуживание, баланс реактивной мощности на месте, тем самым улучшая коэффициент использования распределения, снижая потери в сети, с высокой экономичностью, является одним из наиболее часто используемых средств компенсации реактивной мощности.

3. Централизованная компенсация высокого напряжения

Высоковольтная централизованная компенсация относится к методу компенсации, при котором шунтирующая конденсаторная батарея устанавливается непосредственно на высоковольтную шину 6 ~ 10 кВ подстанции. Он подходит для пользователей, находящихся далеко от подстанции или в конце линии электроснабжения, а сам пользователь имеет определенную высоковольтную нагрузку, которая может снизить потребление реактивной мощности в энергосистеме и может играть определенную компенсационную роль.

Централизованная компенсация высокого напряжения: компенсационное устройство автоматически переключается в зависимости от размера нагрузки, чтобы разумно улучшить коэффициент мощности пользователя и избежать увеличения затрат на электроэнергию, вызванного снижением коэффициента мощности. В то же время он удобен в эксплуатации и обслуживании, а компенсационная выгода высока.

3.2 Реализация метода компенсации реактивной мощности

Как правило, управление оптимизацией реактивной мощности в распределительных сетях достигается за счет использования шунтирующих конденсаторов, наиболее распространенного и важного оборудования для компенсации реактивной мощности. Индуктивная нагрузка в

распределительной сети будет потреблять реактивную мощность, а шунтирующий конденсатор для компенсации реактивной мощности излучает только реактивную мощность, не поглощая реактивную мощность, поэтому его можно использовать для компенсации реактивной мощности, потерь напряжения, потерь в сети и коэффициента мощности в распределительной сети и в то же время улучшить активную пропускную способность линий и трансформаторов. Компенсация реактивной мощности шунтирующего конденсатора обладает такими преимуществами, как низкая стоимость, простота оборудования, комбинация коммутации и группируемого управления, низкое энергопотребление и простота рассредоточенной установки, поэтому она очень распространена в распределительных сетях. На практике также достигнуты хорошие технические результаты, легко реализовано управление оптимизацией реактивной мощности. Шунтирующие конденсаторы, установленные в распределительной сети, должны соответствовать требованиям к напряжению, когда нагрузка системы динамически изменяется, поэтому она часто имеет устройство автоматического управления переключением[45,46].

На этом этапе компенсация реактивной мощности распределительной сети Китая использует компенсацию пользователя, то есть управление реактивной мощностью применяется на стороне низкого напряжения. Недостаток этого метода очевиден, то есть количество общественных трансформаторов велико и разбросано, что не удобно для установки компенсационных устройств, и легко вызвать несчастные случаи безопасности из-за плохого управления, тем самым ограничивая степень компенсации реактивной мощности[54].

С увеличением нагрузки распределительной системы конденсаторы, установленные на выходной линии, все шире используются на практике для того, чтобы нагрузка распределительной сети соответствовала потребности в реактивной мощности. В последние годы, с растущим развитием

автоматизации распределительных сетей в Китае, она привлекает все больше и больше внимания отечественных ученых и исследователей.

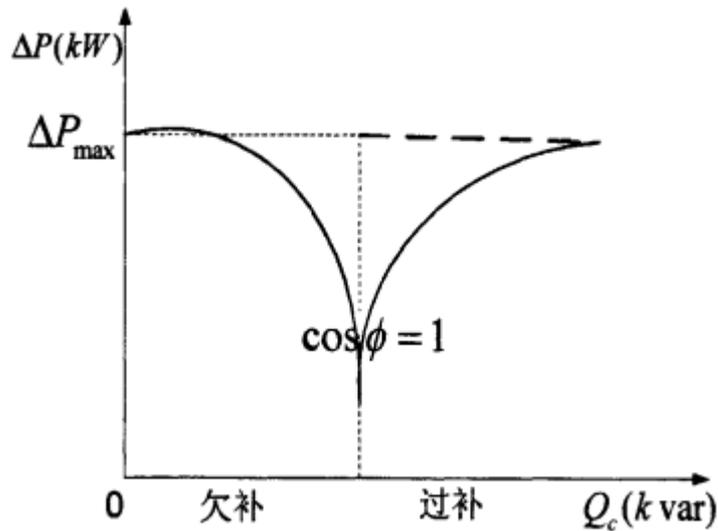


Рис 4 Принципиальная схема влияния управления оптимизацией реактивной мощности на активные потери распределительной сети

$\cos \phi$ — коэффициент мощности линии;

ΔP — снижение активных потерь после компенсации реактивной мощности, (кВт);

Q_c — компенсация реактивной мощности, (квар);

Когда $\cos \phi < 1$ это означает недокомпенсацию, когда $\cos \phi > 1$, это означает сверхкомпенсацию, а когда $\cos \phi = 1$, линия полностью компенсируется. Из рисунка видно, что от нулевой компенсации до полной компенсации активные потери уменьшаются все больше и больше; И наоборот, от полной компенсации к сверхкомпенсации снижается снижение активных потерь линии. Согласно практическому опыту, степень компенсации линии обычно контролируется в пределах 0,9 ~ 0,95.

Оптимизация реактивной мощности распределительной сети является задачей оптимизации для крупномасштабных, нелинейных и прерывистых управляющих переменных. В прошлом исследования традиционных алгоритмов оптимизации были сосредоточены на сходимости алгоритмов, нелинейности функций обработки и дискретных переменных процесса

оптимизации, а с развитием распределительных сетей проблемы оптимизации реактивной мощности становились все более обширными, а также возросли требования к осуществимости схем оптимизации реактивной мощности. Для совершенствования и расширения алгоритма оптимизации это актуально [14].

Конечной целью оптимизации реактивной мощности является снижение активных потерь в сети при сохранении уровней напряжения в допустимых пределах. Оптимизация реактивной мощности достигается за счет изменения распределения потока реактивной мощности, такого как изменение источника питания, впрыска реактивной мощности, изменение амплитуды напряжения, изменение регулируемого отвода трансформатора и т. Д. Требования, подлежащие изучению, различны, и определенная целевая функция и используемый алгоритм оптимизации также различны. Но в целом он условно делится на 4 типа: наименьшие потери в сети; Минимальное отклонение напряжения; Максимальные экономические выгоды; Многоцелевой (например, минимизируйте время переключения конденсаторной батареи с минимальными потерями в сети).

Методы исследования оптимизации реактивной мощности распределительной сети в основном сводятся к традиционным методам оптимизации и методам искусственного интеллекта [8, 9, 10].

К традиционным методам оптимизации относятся: нелинейное программирование, линейное программирование, динамическое программирование и смешанное целочисленное программирование.

К методам искусственного интеллекта относятся: нечеткие алгоритмы, генетические алгоритмы, имитация отжига, методы поиска Табу, а также экспертные системы, алгоритм мультиагентной оптимизации и искусственные нейронные сети.

Концепции и характеристики этих типов методов описаны ниже.

3.3 Традиционные методы оптимизации

К таким методам оптимизации относятся линейное программирование, линейное программирование, квадратичное программирование, смешанное

целочисленное программирование и динамическое программирование. Этот тип алгоритма использует первую или вторую производную целевой функции и ограничений в качестве основной информации для поиска оптимального решения.

1. Методы нелинейного программирования

Поскольку сама энергосистема является нелинейной, метод нелинейного программирования был впервые применен к энергосистеме. Метод нелинейного программирования в оптимизации реактивной мощности вытекает из нелинейных характеристик самой задачи оптимизации реактивной мощности, а его математическая модель проста, а обработка нелинейных функций реализуется путем регулировки направления градиента, а точность вычислений высока. Однако из-за большого количества выводов и обратных операций в процессе решения он занимает больше памяти компьютера, скорость вычислений низкая, сходимость плохая, легко попасть в локальное оптимальное решение, существует дефект «размерного бедствия», и он не может эффективно справляться с дискретными переменными и ограничениями неравенства. Хотя нелинейное программирование является самым ранним алгоритмом оптимизации, применяемым на практике, из-за вышеуказанных дефектов его можно использовать только в качестве вспомогательного алгоритма для расчета локальной оптимизации. В настоящее время основными из них являются метод упрощенного градиента, метод Ньютона, метод сопряженного градиента и метод квадратичного программирования. Принцип упрощенного метода градиента относительно прост, требования к хранилищу невелики, дизайн программы относительно прост, и она имеет скорость сходимости первого порядка, но в процессе вычислений это будет казаться неровным явлением, а сходимость плохая, особенно вблизи наиболее выгодной. Скорость конвергенции очень низкая; Каждая итерация требует пересчета потока мощности, что требует больших вычислительных ресурсов и времени; Кроме того, при использовании штрафной функции для обработки неравенства выбор штрафного

коэффициента оказывает большое влияние на скорость сходимости алгоритма. По сравнению с упрощенным градиентным методом, метод Ньютона представляет собой алгоритм со сходимостью второго порядка, который основан на методе множителя Лагранжа метода нелинейного программирования с использованием матрицы Гейзена, состоящей из второй производной целевой функции, и матрицы Якобиана, составленной из первой производной уравнения потока мощности сети. Управление переменными и множителем Лагранжа с вкраплениями сортировки, унифицированная коррекция. Метод Ньютона имеет скорость замыкания меча второго порядка, в полной мере используя разреженность матрицы для упрощения расчета, но он тратит много времени при решении обратной матрицы Гейзена, а результаты вычислений неточны. Метод сопряженного градиента может эффективно избежать явления «пилообразного» и решить операцию обратной матрицы, но он быстро сходится только в области с сильным квадратизмом целевой функции. Метод квадратичного программирования в основном нацелен на целевую функцию в виде квадратичной функции, которая имеет высокую скорость сходимости и высокую точность вычислений и может напрямую работать с различными ограничениями[21].

2. Методы линейного программирования

Метод линейного программирования применяется к оптимизации реактивной мощности энергосистемы, и его принцип заключается в расширении целевой функции и ограничений формулой Тейлора, опускании члена высокого порядка, так что задача нелинейного программирования преобразуется в задачу линейного программирования вблизи начальной точки значения, а метод последовательной линейной аппроксимации используется для решения оптимизации пространства. Метод линейного программирования является наиболее зрелым методом, непосредственно устанавливающим ограничения на переменные и ограничения, использующим разложение Тейлора, так что нелинейные задачи вблизи начальной точки значения в линейном решении задач, сходимость надежна, высокая скорость вычислений,

может удовлетворить требования к планированию в реальном времени для скорости вычислений, но не может эффективно справляться с проблемами дискретных переменных из-за необходимости нескольких расчетов потока мощности, так что точность оптимизации низкая, эффективность невысока, существует проблема «размерной катастрофы». Наиболее типичными представителями линейного программирования являются анализ чувствительности и метод внутренних точек. Метод анализа чувствительности основан на соотношении чувствительности и решается двойным линейным программированием. Из-за обратности матриц Якоби более высокого порядка вычислительная нагрузка велика, отнимает время вычислений и память, а введенные упрощенные допущения также влияют на точность вычислений и скорость сходимости. Метод внутренней точки имеет высокую скорость вычислений, высокую точность и хорошие характеристики надежности и сходимости, но как обнаружить и справиться с неосуществимым решением в процессе оптимизации, является сложной проблемой, для решения этой проблемы создается множество деформаций метода внутренней точки, таких как метод аффинной шкалы, метод следования по пути, метод исходно-двойной внутренней точки и метод квадратичной внутренней точки. Последующие управляющие переменные «метод возмущений», симплексный метод и двойной симплексный метод с матрицей чувствительности не получили широкого распространения из-за плохой сходимости [19, 20].

3. Методы динамического программирования

Динамическое программирование - это отрасль математического программирования, которая является эффективным методом изучения оптимального решения многоступенчатого процесса принятия решений, поскольку она может решать нелинейные задачи и отражать процесс оптимизации, она была введена в область оптимизации реактивной мощности, в результате чего появился метод динамического программирования оптимизации реактивной мощности. Этот метод оптимизирует задачу из совокупности динамических процессов и разбивает проблему на несколько

взаимосвязанных этапов во времени или пространственном порядке. Метод может использовать многоступенчатый процесс принятия решений для решения статических задач и дискретных задач со многими большими переменными, которые легко решаемы, ясны в процессе и хороши в сходимости, но с увеличением количества переменных будет сложное моделирование, медленная скорость вычислений и проблемы размерных катастроф, что ограничивает широкое применение в технике[23, 24, 25].

4. Смешанные целочисленные методы программирования

Метод смешанного целочисленного программирования является эффективным способом решения проблемы дискретности переменных в оптимизационных вычислениях. Принцип состоит в том, чтобы сначала определить целочисленные переменные, а затем координировать свои действия с линейным программированием для работы с непрерывными переменными. Математическая модель смешанного целочисленного программирования может точно отражать фактическую оптимизацию реактивной мощности, но двухэтапная оптимизация ослабляет ее общую оптимальность, и из-за нелинейной функциональной зависимости между реактивной мощностью и напряжением в процессе решения задачи часто возникает дивергенция колебаний, объем вычислений большой, решение сложное, и с увеличением размерности время расчета резко увеличивается[26, 27].

3.4 Основные средства компенсации реактивной мощности

1. Нечеткий алгоритм

Нечеткий алгоритм является производным от теории нечетких множеств, которая использует нечеткое множество для размывания многоцелевой функции и напряжения нагрузки, дает сегментированную функцию принадлежности каждой целевой функции и преобразует задачу в стандартное линейное программирование и обработку нелинейного программирования. Объем требуемой информации невелик, скорость вычислений высокая, интеллект сильный, сходимость хорошая, она может хорошо отражать

изменение напряжения, ее легко реализовать в Интернете, в полной мере использовать преимущества нечеткой логики, упростить расчет и подходит для решения проблемы неопределенных параметров. Этот метод имеет следующие недостатки: он слишком сложен для решения точных задач; Поскольку в конечном итоге все сводится к задачам линейного или нелинейного программирования, скорость вычислений существенно не улучшается; Введение нечетких операторов приводит к тому, что модель становится нелинейной и влияет на вычислительную эффективность[28, 29, 30].

2. Генетический алгоритм

Генетические алгоритмы основаны на эволюционной теории выживания наиболее приспособленных и выполняют оптимальные расчеты, моделируя генетические процессы организмов. Во-первых, задача оптимизации кодируется как хромосома, а целевая функция преобразуется в адаптивную функцию хромосомы. Затем случайным образом генерируется партия исходных хромосом, и генетические операции, такие как размножение, скрещивание и мутация, выполняются в соответствии со значениями адаптивной функции каждой хромосомы для получения следующего поколения хромосом. После наследования из поколения в поколение, благодаря случайному и структурированному обмену информацией между хромосомами, образуются более превосходные хромосомы, и, наконец, эти хромосомы декодируются и восстанавливаются, и решение проблемы может быть получено. Генетический алгоритм выполняет поиск по нескольким путям от начальной точки, обладает сильной оптимизационной способностью и подходит для решения больших законных, многомерных, многоограничительных и нелинейных дискретных задач, которые могут избежать проблемы «размерной катастрофы», но есть недостатки медленной скорости вычислений и низкой эффективности обработки. Несмотря на то, что разнообразие групп решений увеличивается за счет операторов мутаций и

гарантируется возможность глобального поиска, легко привести к слепому поиску и произвести «преждевременную конвергенцию»[11, 31].

3. Имитационный метод отжига

Метод имитации отжига представляет собой алгоритм случайной оптимизации, основанный на стратегии итерационного решения Methe.Carlo, который имитирует технологию отжига нагрева расплавленного металла для поиска глобального оптимального решения. Основываясь на сходстве между процессом отжига металлов и общей задачей оптимизации комбинации, этот метод использует критерий случайной приемки Метрополиса, чтобы принять раствор для ухудшения, который может содержать кусок гена превосходного раствора в ограниченной степени, и постепенно снизить вероятность получения раствора для ухудшения, чтобы обеспечить втягивание меча алгоритма и избежать попадания в локальный оптимум. По сравнению с генетическим алгоритмом, метод имитации отжига отличается высоким качеством, универсален и прост в достижении, может генерировать разгруппировку за счет случайных возмущений, обладает сильной способностью выпрыгивать из локальной оптимизации и имеет хорошую глобальную сходимость. Однако, поскольку этот метод основан на механизме поиска предметной области и не имеет возможности памяти, сложность алгоритма быстро возрастает с расширением масштаба системы, поэтому скорость вычислений медленная, что вызовет повторный поиск локального оптимального решения[33, 34].

4. Метод поиска табу

С развитием компьютерных технологий современные эвристические алгоритмы развивались стремительно, и наиболее успешным является метод поиска табу (метод поиска табу). Этот метод сначала генерирует исходное решение, использует набор операций «перемещения», случайным образом генерирует серию экспериментальных решений из текущей окрестности решения, выбирает «перемещение» с наибольшим улучшением целевой функции для выполнения текущего решения и повторяет итерацию до тех пор,

пока не будет выполнен определенный критерий завершения. Метод поиска табу имеет следующие преимущества: использование технологии кодирования оптимизации и технологии памяти для записи и выбора предыдущего процесса оптимизации, а также ускорения общей скорости оптимизации; Он может эффективно определить локальное оптимальное решение и выпрыгнуть, принудительно скорректировав направление поиска; Таблица Табу используется для предотвращения повторных поисков с меньшим количеством итераций и высокой эффективностью сходимости; Нет необходимости использовать случайные числа, что более эффективно для больших сложных задач оптимизации. Однако, основываясь на односточной памяти, скорость сходимости и окончательное решение тесно связаны с начальным значением, и расширение таблицы Табу снизит эффективность поиска, а способность глобального поиска не очень хороша[35].

5. Экспертные системы и искусственные нейронные сети

Экспертная система - это компьютерная программа, которая моделирует людей-специалистов для решения практических задач, особенно подходящих для объекта исследования, не имеющего точной математической модели, алгоритма и нуждающегося в опыте, знаниях и исторических данных специалистов в данной области для решения задачи, может рассматриваться как разработка эвристических методов, основанных на единстве экспертного опыта и данных расчетных программ. Этот метод широко собирает знания и стратегии экспертов в области энергосистем и использует компьютерный анализ и обработку для обеспечения поддержки принятия решений для решения задач оптимизации реактивной мощности в реальном времени.

6. Алгоритм мультиагентной оптимизации

Алгоритм многоагентной оптимизации представляет собой комбинацию алгоритма оптимизации и многоагентной системы, которая является новым алгоритмом искусственного интеллекта. «Применение алгоритма оптимизации многоинтеллектуальных искателей в оптимизации системы реактивной мощности» предлагает построить среду информационного

взаимодействия между частицами в соответствии с обобщенной идеей многоагентной системы и обновить положение каждой частицы в пространстве решения таким образом, чтобы она могла быстрее и точнее сойтись к глобальному оптимуму. «Алгоритм оптимизации многоагентного роя частиц для оптимизации реактивной мощности энергосистемы» предлагает многоагентный алгоритм оптимизации роя частиц для достижения оптимального управления и планирования напряжения и реактивной мощности, который использует преимущества как многоагентной системы, так и технологии оптимизации роя частиц и может быстрее и точнее прийти к глобальному оптимальному решению. По сравнению с несколькими другими интеллектуальными алгоритмами, мультиинтеллектуальный алгоритм тела имеет преимущества в точности вычислений, стабильности сходимости и времени оптимизации[36, 37 ,38].

4 ОБЗОР ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

4.1 Основные принципы и обзор генетических алгоритмов

4.1.1 Возникновение и развитие генетических алгоритмов

Генетический алгоритм (Genetic Algorithm) был впервые предложен John Holland из США в 70-х годах 20 века в книге «Адаптация природных систем и искусственных систем», которая разработана и предложена в соответствии с эволюционными законами организмов в природе (выживание наиболее приспособленных, выживание наиболее приспособленного генетического механизма), в которых систематически излагаются основные теории и методы генетических алгоритмов и поощряется развитие генетических алгоритмов. После 80-х годов 20 века генетические алгоритмы вступили в период расцвета и развития. Этот алгоритм представляет собой вычислительную модель, имитирующую процесс биологической эволюции естественного отбора и генетический механизм теории биологической эволюции Дарвина, и является методом поиска оптимального решения путем моделирования естественного процесса эволюции. Алгоритм использует компьютерное моделирование, чтобы преобразовать процесс решения проблем в процесс, аналогичный кроссоверу и мутации генов хромосом в биологической эволюции. При решении более сложных комбинаторных задач оптимизации лучшие результаты оптимизации обычно могут быть получены быстрее, чем некоторые обычные алгоритмы оптимизации. Сегодня генетические алгоритмы широко используются в комбинаторной оптимизации, машинном обучении, обработке сигналов, адаптивном управлении и искусственной жизни из-за их практической и эффективной полезности. Это одна из ключевых технологий в современных интеллектуальных вычислениях.

Поскольку общая стратегия поиска и метод поиска оптимизации генетического алгоритма не полагаются на градиентную информацию или другие вспомогательные знания при вычислении, а должны только влиять на целевую функцию направления поиска и соответствующую функцию

приспособленности, генетический алгоритм обеспечивает общую основу для решения сложных системных задач, которая не зависит от конкретной области задачи и обладает сильной устойчивостью к типу задачи, поэтому он широко используется во многих науках[41,44, 52].

1. Оптимизация функций

Оптимизация функций является классической областью применения генетических алгоритмов, а также распространенным примером оценки производительности генетических алгоритмов, и многие люди построили множество сложных форм тестовых функций: непрерывные и дискретные функции, выпуклые и вогнутые функции, низкоразмерные и многомерные функции, унимодальные функции и мультимодальные функции. Для некоторых нелинейных, мультимодальных, многокритериальных задач оптимизации функций их трудно решить другими методами оптимизации, в то время как генетические алгоритмы могут легко получить лучшие результаты.

2. Комбинаторная оптимизация

По мере увеличения масштаба задачи резко увеличивается и пространство поиска комбинаторной задачи оптимизации, и иногда бывает трудно найти оптимальное решение, используя метод перечисления в расчете. Для таких сложных проблем люди поняли, что основное внимание должно быть сосредоточено на поиске удовлетворительных решений, и генетические алгоритмы являются одним из лучших инструментов для поиска таких удовлетворительных решений. Практика доказала, что генетический алгоритм очень эффективен для задач NP в комбинаторной оптимизации. Например, генетические алгоритмы были успешно применены для решения задач коммивояжера, рюкзаков, упаковок и графических деление.

Кроме того, генетические алгоритмы также широко используются в задачах планирования производства, автоматическом управлении, робототехнике, обработке изображений, искусственной жизни, генетическом кодировании и машинном обучении.

3. Проблемы с планированием

Задача планирования является типичной NP-трудной задачей, генетический алгоритм как классический интеллектуальный алгоритм широко используется в планировании семинаров, многие ученые стремятся использовать генетический алгоритм для решения проблем планирования и в настоящее время достигли очень плодотворных результатов. От первоначальной традиционной задачи планирования мастерских (JSP) до задачи гибкого планирования работы цеха (FJSP) генетический алгоритм имеет отличную производительность и получил оптимальное или почти оптимальное решение во многих примерах.

4.1.2 Генетические алгоритмы и естественный отбор

Теория естественного отбора Дарвина является широко распространенной теорией биологической эволюции. Эта доктрина утверждает, что для того, чтобы живые существа выжили, они должны вести борьбу за выживание. Борьба за выживание включает в себя три аспекта: внутривидовую борьбу, межвидовую борьбу и борьбу между живыми существами и неорганической средой. В борьбе за выживание особи с благоприятными мутациями, как правило, выживают и имеют больше возможностей передать благоприятные варианты потомству; Особи с неблагоприятными мутациями с большей вероятностью будут устранены и имеют гораздо меньше шансов произвести потомство. Поэтому все особи, побеждающие в борьбе за выживание, относительно приспособляются к окружающей среде. Дарвин называл этот процесс выживания наиболее приспособленных и устранения непригодных в борьбе за выживание естественным отбором. Это показывает, что наследственность и изменчивость являются внутренними факторами, определяющими биологическую эволюцию. Причина, по которой различные организмы в природе могут приспособляться к окружающей среде, выживать и развиваться, неотделима от генетических и мутировавших жизненных явлений. Именно эта генетическая характеристика организмов позволяет видам в биологическом

мире оставаться относительно стабильными; Мутации характеризуют организмы, заставляя их производить новые черты и, таким образом, образовывать новые виды, что способствует эволюции и развитию организмов.

Генетические алгоритмы — это вычислительные модели, которые имитируют генетический отбор Дарвина и естественную отбраковку биологической эволюции. Его идеи основаны на биогенетике и естественных законах выживания наиболее приспособленных и представляют собой алгоритмы поиска с итеративным процессом «выживание + обнаружение». Генетические алгоритмы нацелены на всех особей в популяции и используют методы рандомизации для эффективного поиска закодированного пространства параметров. Среди них отбор, кроссовер и вариация представляют собой генетическую манипуляцию генетическим алгоритмом; Пять элементов кодирования параметров, начальной настройки популяции, проектирования функции приспособленности, дизайна генетической операции и настройки параметров управления составляют основное содержание генетического алгоритма. Как новый алгоритм поиска глобальной оптимизации, генетический алгоритм широко используется в различных областях благодаря своим замечательным характеристикам, таким как простота и универсальность, высокая надежность, пригодность для параллельной обработки, высокая эффективность и практичность, и достиг хороших результатов и постепенно стал одним из важных интеллектуальных алгоритмов.

4.1.3 Основными терминами для генетических алгоритмов

Отбор(Selection), кроссовер(Crossover) и мутация(Mutation) — это три генетические операции в генетическом алгоритме и три основных оператора алгоритма. Пять основных шагов для реализации генетического алгоритма: настройка контрольных параметров, кодирование хромосом, создание исходных популяций, проектирование функций приспособленности и реализация генетических манипуляций[32, 39].

1. Отбор(Selection): Это отбор особей из группы, которые более приспособлены к окружающей среде. Эти отобранные особи используются для воспроизводства следующего поколения. Поэтому эту операцию иногда называют размножением. Поскольку количество воспроизводства определяется в соответствии с приспособленностью особи к окружающей среде при отборе особей для размножения, ее иногда называют дифференциальным воспроизводством.

2. Кроссовер(Crossover): это обмен генами в одном и том же положении двух разных особей у особей, отобранных для размножения следующего поколения, в результате чего образуется новая особь.

3. Мутация(Mutation): это анизотропная трансформация определенных генов у выбранного особей. В строке символов, если ген равен 1, он становится 0 при мутации; И наоборот.

4. Хромосома(Chromosome): Каждая хромосома в популяции индивидуальна, и они соответствуют реальному решению в определенной области. Хромосомы обычно представлены строкой двоичных кодов или десятичных чисел, т.е. кодированием хромосом. Для одномерной одной хромосомы представляет одну переменную: в то время как для многомерной одна хромосома может представлять несколько переменных путем конкатенации.

5. Ген(Gene): Гены - это элементы хромосом, которые представляют характеристики особей. Например, если есть строка (т.е. хромосома) $S = 1011$, четыре элемента 1, 0, 1 и 1 называются генами.

6. характеристическое значение(Feature) : При использовании строк для представления целых чисел характеристические значения генов согласуются с весом двоичных чисел; Например, в строке $S=1011$ 1 в позиции гена 3 имеет характерное значение гена 2; 1 в позиции гена 1, которая имеет значение генетической характеристики 8.

7. Популяция: Группа из нескольких индивидуумов, каждая из которых соответствует осуществимому решению, так что популяция представляет

собой набор из множества осуществимых решений. Манипулируя операторами для обновления людей, ГА может завершить общую эволюцию всей популяции.

8. Фитнес-функция(Fitness): Фитнес используется для характеристики и оценки превосходства и недостатка каждого человека в популяции. Он служит основой для последующих генетических манипуляций. Вообще говоря, функция приспособленности и целевая функция тесно связаны и трансформируются из последней. Крайние точки и области возможных решений функции приспособленности такие же, как и у целевой функции, а диапазон неотрицателен. Самый простой и распространенный способ состоит в том, чтобы принять функцию приспособленности как обратную целевой функции.

9. Аллели: наличие генов в одном и том же положении в разных хромосомах;

10. Кодирование: Процесс кодирования на самом деле представляет собой процесс представления каждой переменной двоичными или десятичными цифрами для образования множества индивидуумов. Кодирование должно следовать некоторым правилам кодирования, если решаемая задача содержит несколько переменных, они должны быть объединены вместе, чтобы сформировать строку кодов для формирования личности.

11. Декодирование: Декодирование - это обратный процесс кодирования. Посредством декодирования гены особей могут быть преобразованы в фактические значения для каждой переменной.

4.1.4 Особенности генетических алгоритмов

Генетический алгоритм является универсальным алгоритмом для решения поисковых задач и может использоваться для решения различных общих задач. Общими характеристиками поисковых алгоритмов являются[40]:

1. Во-первых, сформируйте набор решений-кандидатов

2. Измерить пригодность этих решений-кандидатов в соответствии с определенными адаптивными условиями

3. Сохранить некоторые решения-кандидаты в соответствии с пригодностью и отказаться от других

4. Выполните определенные операции с сохраненными решениями-кандидатами для создания новых решений-кандидатов.

В генетических алгоритмах вышеперечисленные признаки сочетаются особым образом: параллельный поиск по хромосомным группам, операции отбора с угадыванием природы, обменные операции, мутационные операции. Эта особая комбинация отличает генетические алгоритмы от других алгоритмов поиска.

Генетический алгоритм также имеет следующие характеристики:

1. Алгоритм начинает поиск с серии решений проблемы, а не с одного решения. Это большая разница между генетическими алгоритмами и традиционными алгоритмами оптимизации. Традиционный алгоритм оптимизации итеративно решает оптимальное решение из одного начального значения; Легко сбиться с пути к местному оптимальному решению. Генетический алгоритм начинает поиск с ряда, который имеет большой охват и способствует глобальному отбору.

2. Генетический алгоритм обрабатывает несколько особей в популяции одновременно, то есть оценивается несколько решений в пространстве поиска, что снижает риск попадания в локальное оптимальное решение, а сам алгоритм легко достигает распараллеливания.

3. Генетический алгоритм в основном не использует знание пространства поиска или другую вспомогательную информацию, а только использует значение функции приспособленности для оценки индивидуума и выполняет генетические операции на этой основе. Функция приспособленности не только не ограничена непрерывной дифференцируемостью, но и область ее определения может быть задана

произвольно. Эта особенность значительно расширяет область применения генетических алгоритмов.

4. Генетический алгоритм использует не детерминистское правило, а правило изменения вероятности, чтобы направлять направление поиска.

5. Самоорганизующийся, адаптивный и самообучающийся. Когда генетические алгоритмы используют информацию, полученную эволюционным процессом, для организации собственного поиска, особи с высокой приспособленностью имеют более высокую вероятность выживания и получают генетическую структуру, более приспособленную к окружающей среде.

6. Кроме того, сам алгоритм также может использовать динамическую адаптивную технологию для автоматической настройки параметров управления алгоритмом и точности кодирования в процессе эволюции, например, с использованием нечетких адаптивных методов.

Кроме того, генетический алгоритм имеет некоторые недостатки:

1. Нарушения кодирования и неточности в существовании кодирования.
2. Кодирование одного генетического алгоритма не может всесторонне представить ограничения задачи оптимизации. Одним из способов рассмотрения ограничений является применение пороговых значений к неосуществимым решениям, так что время вычислений неизбежно увеличивается.

3. Генетические алгоритмы, как правило, менее эффективны, чем другие традиционные методы оптимизации.

4. Генетические алгоритмы склонны к преждевременной конвергенции.

5. Не существует эффективного метода количественного анализа точности, осуществимости, вычислительной сложности и других аспектов генетического алгоритма.

4.1.5 Запущенный процесс генетического алгоритма

1. Кодирование параметров

В процессе работы генетического алгоритма алгоритм не воздействует непосредственно на саму искомую переменную. Если решаемая проблема является многомерной, генетический алгоритм кодирует переменные двоичными или десятичными числами и объединяет их вместе, образуя кодовую цепочку, которая представляет определенную структуру, называемую хромосомами, то есть особей в популяции. Кодовая цепочка хромосом содержит особенности и переменные решаемой инженерной задачи, аналогично понятию генов в биологии[42].

Основная единица, из которой состоят хромосомы у каждого человека, то есть любой бит в коде каждой особи, называется геном. Общее количество цифр генов, содержащихся в хромосоме, называется длиной хромосомы. Несколько «особей» вместе составляют популяцию в генетическом процессе, то есть эволюционное поколение. Общее количество хромосом в популяции называется размером популяции. Концепция кодирования в генетических алгоритмах представляет собой процесс отображения из проблемного пространства в пространство генетических алгоритмов; Декодирование или декодирование — это процесс отображения из пространства генетического алгоритма в проблемное пространство.

Существует множество широко используемых методов кодирования, таких как двоичное кодирование и десятичное кодирование. Среди множества методов кодирования двоичное кодирование имеет большие преимущества из-за удобной работы и четкой концепции принципа. Кроме того, десятичная переменная представлена двоичным числом, потому что она занимает больше цифр, так что описание переменной становится более подробным. Это эквивалентно повышению точности поиска, так что генетический алгоритм может с большой вероятностью сойтись к глобальному оптимальному решению.

2. Оценка преимуществ и недостатков особи

значения приспособленности особи, или функции-фитнеса особи, используются в генетических алгоритмах для характеристики и оценки

степени превосходства особи и недостатка. Так называемые преимущества и недостатки индивидуума относятся к степени, в которой индивид (решение) является оптимальным решением мира. Как способ и средство оценки преимуществ и недостатков особей в генетических алгоритмах, критерии оценки адаптивной функции будут варьироваться в зависимости от решенной или оптимизированной задачи. Функция приспособленности преобразуется из целевой функции, а крайние точки и область возможного решения функции приспособленности такие же, как и целевая функция, а диапазон неотрицателен. Самый простой и распространенный способ состоит в том, чтобы принять функцию приспособленности как обратную целевой функции. Таким образом, задача нахождения минимума целевой функции трансформируется в задачу нахождения максимального значения функции приспособленности, и причина этого преобразования заключается в облегчении операции в генетическом алгоритме. Таким образом, каждый особь соответствует значению функции приспособленности, чем больше значение, тем лучше качество особи в качестве решения, то есть особь более приспособлен к определенной жизненной среде, отраженной в работе алгоритма, должна увеличиваться вероятность того, что особь войдет в следующее поколение эволюции, так что хорошая производительность в его генах передается по наследству[43, 47, 48].

3. Выберите

Отбор относится к процессу отбора особей с хорошими функциями приспособленности из родительской популяции и отсеивания бедных особей. Он может быть напрямую скопирован с превосходных генов следующему поколению или получен путем перекрестного спаривания, и благодаря таким операциям характеристики превосходных особей могут быть переданы следующему поколению.

Есть много методов на выбор, наиболее часто используемые[47, 51]:

(1) Метод рулетки.

Рулетка в полной мере отражает эволюцию генетических алгоритмов от идеи закона природы «выживания сильнейшего». Его основная основа заключается в том, что чем больше значение приспособленности особи в популяции, тем лучше особь, то по критерию выживания наиболее приспособленного, тем больше шансов на то, что особь будет выбрана, рулетка является одним из наиболее часто используемых и основных методов отбора в генетических алгоритмах на данном этапе. Однако недостатком метода рулетки для селекционных операций является то, что при наличии суперорганизмов это приведет к преждевременной конвергенции, то есть явлению «скороспелости».

(2) Закон о конкуренции двух пар.

В центре внимания метода двухпарной конкуренции находится «конкуренция», специфический процесс конкуренции заключается в случайном выборе двух разных особей из родительской популяции (понятие «случайный» важно) и сравнении их адаптационных значений. Если значение приспособленности велико, это означает, что это относительно хороший человек, и он сохраняется; Если значение пригодности невелико, это означает, что это относительно бедный человек, и он будет устранен. Преимущество метода двухпарной конкуренции заключается в том, что с помощью механизма «двухпарной конкуренции» один обеспечивает хорошую дисперсию особей в пространстве растворов, а другой заставляет индивидуумов, которые попадают в библиотеку спаривания, иметь лучшие гены, то есть более высокую приспособленность.

(3) Метод выбора сортировки.

Значение сортировки относится к упорядочиванию в соответствии с размером значения пригодности каждого особь, а затем к выбору на основе особей, которые были пронумерованы по порядку, и, наконец, к тому, чтобы вероятность выбора каждого особь была связана только с соответствующим порядковым номером. Недостатком является то, что выбранный особь не имеет ничего общего с его значением пригодности, а только с числом, поэтому

для того, чтобы гарантировать, что значение пригодности всегда является критерием оценки того, выбран ли особь, необходимо заранее определить сопоставление между вероятностью выбора особь и ранжированным числом, и в методе есть расчетные и статистические ошибки.

4. Размножение

Процесс размножения в генетических алгоритмах – это операция отбора особей по определенной вероятности и копирования их следующему поколению. Обычно используются два типа методов селекции: один - гибридизация, а другой - мутация. Концепции гибридизации и вариации описаны ниже, соответственно.

(1) Гибридизация

Уникальная операция в генетических алгоритмах — гибридизация, также известная как кроссовер, как уникальная операция в генетических алгоритмах, моделирует процесс кроссовера генов в природе и используется для нахождения оптимального особь в алгоритме, который хорошо работает.

Операция гибридизации последовательно делится на два этапа, один из которых взят из библиотеки спаривания отдельных генов, сформированной завершением предыдущей операции «отбора», особи случайным образом спариваются, и необходимость скрещивания каждой пары особей определяется заданной вероятностью кроссовера; Во-вторых, установить положение пересечения каждой пары пар, а положение пересечения определяется случайно сгенерированной позицией. После определения места пересечения серия генов до пересечения двух парных особей остается неизменной, а нити, расположенные после пересечения, обмениваются друг с другом, чтобы создать двух новых особей для входа в следующее поколение. Из-за случайности пересечения шансы на то, какие генные биты обмениваются у двух парных особей, равны.

В процессе гибридизации отличная генетическая информация может быть передана следующему поколению, так что превосходные черты могут быть унаследованы до тех пор, пока не будет найдено оптимальное решение.

(2) Мутация

Мутации в генетических алгоритмах, чтобы избежать попадания полученного решения в локальный оптимум. Благодаря мутационным операциям он поддерживает популяционное разнообразие, ищет несколько путей и избегает локальной конвергенции. Процесс мутации - это изменение значений генов в определенных позициях генов в хромосомной цепочке индивидуума в популяции. Основным этапом мутационной операции является случайное определение местоположения мутации в генах всех особей в популяции и изменение значений генов в этих местах с заранее заданной вероятностью мутации. Каждый бит гена каждого индивидуума может производить мутацию, сначала нужно установить вероятность мутации, а затем сгенерировать случайное число между (0,1) и сравнить его с вероятностью мутации, если она меньше вероятности мутации Значение бита гена остается неизменным, в противном случае бит гена сводится на нет. Операция мутации также делится на различные методы, такие как одноточечная мутация и многоточечная мутация, учитывая время расчета и сложность, одноточечная мутация относительно проста и практична.

5. Расшифровать

Декодирование — это процесс, обратный кодированию, который представляет собой операцию приведения двоичного генетического кода к соответствующим параметрам десятичной переменной, чтобы подготовиться к последующим фактическим инженерным расчетам. Блок-схема базового генетического алгоритма показана на рисунке 5.

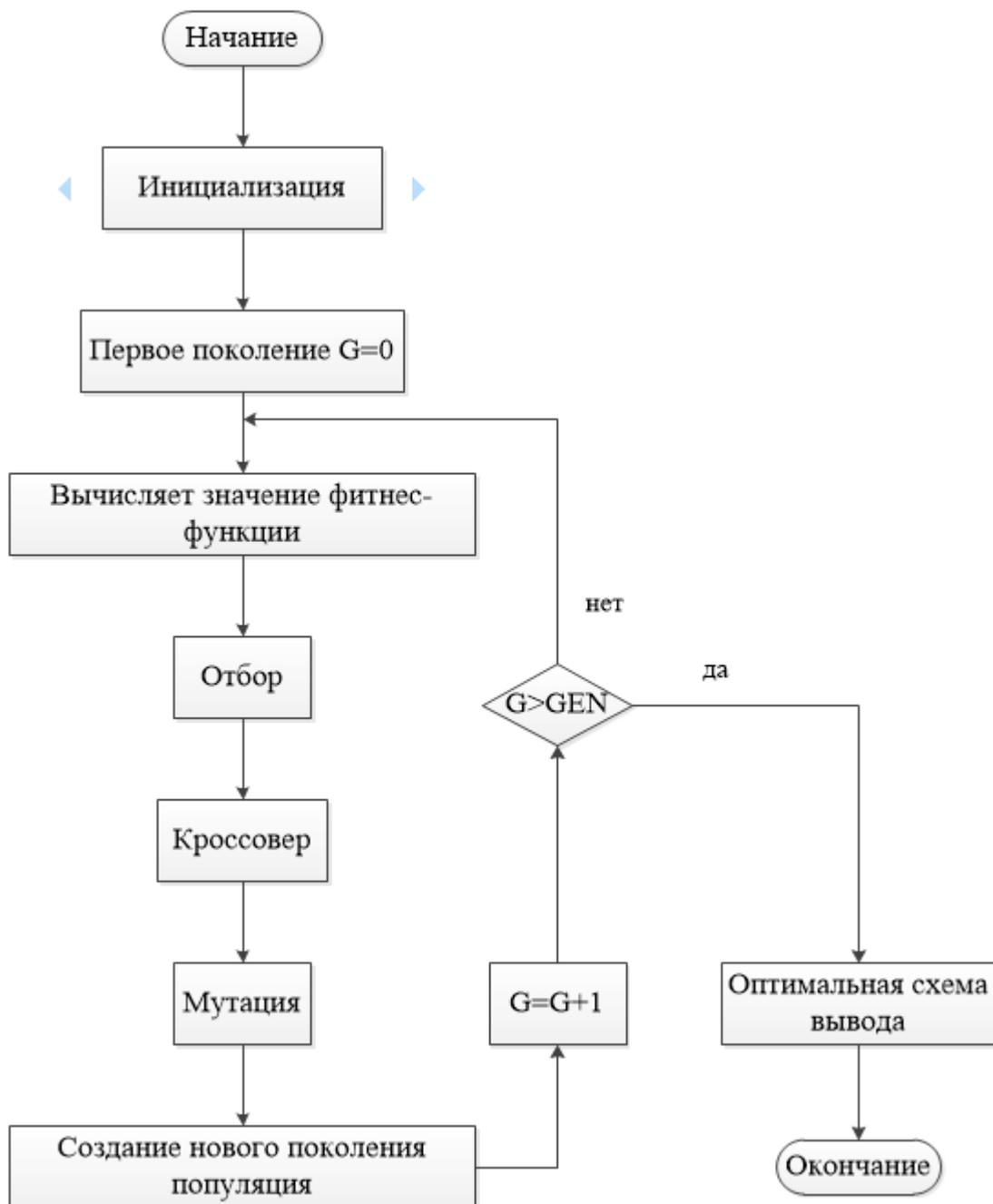


Рис 5 Блок-схема работы генетического алгоритма

4.2 Схема оптимизации реактивной мощности распределительной сети на основе генетического алгоритма

Вообще говоря, независимо от того, является ли энергосистема большой или маленькой, проблема оптимизации реактивной мощности заключается в том, чтобы изучить, как выбрать место входа, входную мощность и время инвестирования нового оборудования для компенсации реактивной мощности

в течение определенного периода времени для достижения наилучшего эффекта. Планирование оптимизации реактивной мощности энергосистемы включает в себя две проблемы: во-первых, проблему эксплуатации. Проблемой эксплуатации является также проблема оптимизации реактивной мощности сети диспетчеризации, которая относится к цели различных принимаемых решений по реактивной мощности системы, должна быть наилучшая эксплуатационная экономичность системы, то есть минимальные активные потери в сети. Во-вторых, вопрос инвестиций. Инвестиционная задача, то есть задача оптимальной конфигурации реактивной мощности в энергосистеме, относится к решению вопроса о стоимости нового реактивного оборудования в энергосистеме, что является нелинейной многомерной задачей планирования. В общем методе обработки часто используется традиционный метод программирования, а линейное программирование или метод нелинейного программирования, основанный на дифференциальном исчислении, используется для определения направления оптимизации, которое легко попасть в локальную оптимизацию или привести к дивергенции. Целевая функция задачи конфигурации оптимизации реактивной мощности энергосистемы обычно выражает явную функцию управляющей переменной, которая представляет собой сложную, нелинейную и прерывистую задачу планирования. Поэтому использование генетического алгоритма для построения схемы оптимизации реактивной мощности распределительной сети является целесообразным и эффективным.

Задача конфигурации оптимизации реактивной мощности в распределительной сети, по сути, состоит в определении типа, расположения и емкости конденсаторов для конфигурации оптимизации реактивной мощности при условии, конечно, соблюдения определенных ограничений. Математически эта задача относится к смешанной целочисленной нелинейной оптимизации. Целевая функция, выявленная в этой задаче, недифференцируема, а масштаб распределительной сети настолько велик, что не может быть решен традиционными традиционными методами. Учитывая

такую сложную ситуацию, в данной работе используется генетический алгоритм для решения проблемной модели, в полной мере раскрывая преимущества сильной адаптивности и надежности генетического алгоритма. Цель построения оптимизационной модели компенсации реактивной мощности для локальных региональных электрических сетей заключается в следующих двух моментах: во-первых, найти оптимальную конфигурацию компенсационной мощности реактивной мощности каждого узла; Во-вторых, необходимо соответствовать требованиям напряжения, не превышающего предел, и другим эксплуатационным ограничениям.

1. Целевая функция

Целью целевой функции является количественный анализ и выдача критериев оценки с целью выбора оптимального решения при наличии различных решений задачи планирования. Метод статической оценки и метод динамической оценки являются широко используемыми методами экономической оценки в современной энергосистеме. В отличие от этого, динамический метод учитывает фактор времени, который более практичен и чаще используется. Обычно используемый метод динамической оценки делится на четыре типа: метод чистой приведенной стоимости, метод равной годовой стоимости, метод годовой стоимости и метод внутренней нормы прибыли. Специфическими для оптимального планирования распределительных сетей являются методы чистой приведенной стоимости и равные годовые стоимостные издержки являются решениями, принятыми в большинстве случаев в настоящее время. Это благодаря преимуществам их простых и разумных расчетов.

2. Ограничения

Использование ограничений часто используется для обеспечения безопасной работы и качества электроэнергии энергосистемы, а также существуют ограничения уравнения потока мощности и ограничения рабочих пределов. Эти два ограничения описаны ниже:

(1) Ограничения уравнения расхода мощности

$$P_i - U_i \sum_{j=1}^{j=n} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (17)$$

$$Q_i - U_i \sum_{j=1}^{j=n} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \quad (18)$$

где P_i — Вводимая активная мощность на узле i ;

Q_i — Инжекционная реактивная мощность на узле i ;

G_{ij} — Проводимость между узлами i и j ;

B_{ij} — Электронатрий между узлами i и j ;

δ_{ij} — Разница в фазовом угле между U_i и U_j ;

Уравнения (18) и (19) являются полярными формами уравнения узлового баланса мощности, рассчитанного методом течения мощности Ньютона–Рафтсона.

(2) Переменные ограничения

1) Ограничение напряжения:

$$U_{imin} \leq U_i \leq U_{imax}$$

2) Компенсировать ограничения пропускной способности:

$$Q_{imin} \leq Q_i \leq Q_{imax}$$

3) Ограничение положения отвода трансформатора:

$$T_{Bmin} \leq T_B \leq T_{Bmax}$$

4) Ограничение выходной мощности генератора:

$$Q_{gimin} \leq Q_{gi} \leq Q_{gimax}$$

5 АНАЛИЗ ОПТИМИЗАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПОДСТАНЦИИ NO I И ЕЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

5.1 Вычислительный анализ метода Ньютона-Рафтсона

Метод Ньютона-Рафтсона является широко используемым методом решения систем нелинейных уравнений, а также широко используемым методом расчета потока мощности. Принцип состоит в том, чтобы обрабатывать нелинейное уравнение путем его линеаризации в ходе каждой итерации для достижения ступенчатого приближения. Ниже приводится краткое описание метода Ньютона-Рафтсона.

5.1.1 Основное содержание закона Ньютона-Рафтсона

Функция известной переменной X имеет вид:

$$f(x) = 0 \quad (19)$$

Для этого уравнения начните с соответствующего приближения $x^{(0)}$, согласно

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - \frac{f(x^{(n)})}{f'(x^{(n)})} \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (20)$$

Повторные вычисления выполняются до тех пор, пока $x^{(n)}$ не удовлетворяет определенным условиям сходимости, и в этот момент $x^{(n)}$ является корнем приведенного выше уравнения. Такой подход известен как метод Ньютона-Рафтсона.

Также можно сделать следующее объяснение

Если погрешность между решением $x^{(n)}$ и истинным значением x , полученным на n -й итерации, равна $\Delta x^{(n)}$, то:

$$f(x^{(n)} + \Delta x^{(n)}) = 0 \quad (21)$$

Разверните функцию в левой части уравнения (21) рядом с $x^{(n)}$ и разверните $\Delta x^{(n)}$ с помощью ряда Тейлора:

$$\begin{aligned} f(x^{(n)} + \Delta x^{(n)}) \\ = f(x^{(n)}) + \Delta x^{(n)} f'(x^{(n)}) + \frac{(\Delta x^{(n)})^2}{2!} f''(x^{(n)}) + \dots \end{aligned} \quad (22)$$

где $f'(x^{(n)})$, $f''(x^{(n)})$, \dots , $f^{(n)}(x^{(n)})$ соответственно являются первой производной функции $f(x)$ при $x^{(n)}$, второй производной, ..., n -й производной.

Здесь, если значение ошибки $\Delta x^{(n)}$ невелико, то часть после $(\Delta x^{(n)})^2$ уравнения (22) может быть опущена, и ее можно упростить до:

$$f(x^{(n)} + \Delta x^{(n)}) = f(x^{(n)}) + \Delta x^{(n)} f'(x^{(n)}) = 0 \quad (23)$$

Уравнение (23) является поправочным уравнением для величины поправки $\Delta x^{(n)}$. Решением этого уравнения является поправка переменной, которая является погрешностью $x^{(n)}$.

$$\Delta x^{(n)} = -\frac{f(x^{(n)})}{f'(x^{(n)})} \quad (24)$$

Модифицируем приближенное решение выражением $\Delta x^{(n)}$, чтобы получить

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} + \Delta x^{(n)} = x^{(n)} - \frac{f(x^{(n)})}{f'(x^{(n)})} \quad (25)$$

Чтобы было ясно здесь, уравнение (24) является представлением $\Delta x^{(n)}$ является упрощенным решением после пропуска члена более высокого порядка, поэтому поправка уравнения (25) $\Delta x^{(n)}$ также является приближением, поэтому решение $x^{(n+1)}$, модифицированное этой поправкой, все еще имеет некоторую ошибку с истинным решением x .

Такие итерационные вычисления могут повторяться неоднократно, и общая формула итерационных вычислений выглядит следующим образом:

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - \frac{f(x^{(n)})}{f'(x^{(n)})} \quad (26)$$

Задайте критерий сходимости для итеративного процесса:

$$|f(x^{(n)})| < \varepsilon_1, |\Delta x^{(n)}| < \varepsilon_2$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — предопределенные малые положительные числа

При заданных n уравнениях для n переменных существует система нелинейных уравнений:

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\ \vdots & \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \end{aligned} \quad (27)$$

Предположим, что начальными значениями каждой переменной являются $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$; Величина поправки для каждой переменной: $\Delta x_1^{(0)}, \Delta x_2^{(0)}, \dots, \Delta x_n^{(0)}$, тогда есть

$$\begin{aligned} f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)}) &= 0 \\ f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)}) &= 0 \\ \vdots & \\ f_n(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)}) &= 0 \end{aligned} \quad (28)$$

Рядом с начальным значением уравнения (28) разверните в соответствии с рядом Тейлора и опустите квадратичные и выше более высокие члены $\Delta x_1^{(0)}, \Delta x_2^{(0)}, \dots, \Delta x_n^{(0)}$.

$$\begin{aligned}
 f_1(x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\Big|_0 \Delta x_1^{(0)} + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n}\Big|_0 \Delta x_n^{(0)}\right) &= 0 \\
 f_2(x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\Big|_0 \Delta x_1^{(0)} + \dots + \frac{\partial f_2}{\partial x_n}\Big|_0 \Delta x_n^{(0)}\right) &= 0 \\
 \vdots & \\
 f_n(x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\Big|_0 \Delta x_1^{(0)} + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_n}\Big|_0 \Delta x_n^{(0)}\right) &= 0
 \end{aligned} \tag{29}$$

Уравнение (28) представляет собой набор линейных уравнений, часто называемых модифицированным уравнением. Перепишем уравнение следующим образом:

$$\begin{bmatrix} f_1(x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ f_2(x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ \vdots \\ f_n(x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}\Big|_0 & \frac{\partial f_1}{\partial x_2}\Big|_0 & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n}\Big|_0 \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1}\Big|_0 & \frac{\partial f_2}{\partial x_2}\Big|_0 & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n}\Big|_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1}\Big|_0 & \frac{\partial f_n}{\partial x_2}\Big|_0 & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n}\Big|_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix} \tag{30}$$

Или сократите приведенное выше уравнение следующим образом:

$$\Delta \mathbf{f} = \mathbf{J} \Delta \mathbf{x} \tag{31}$$

где \mathbf{J} – якобианская матрица f_i ;

$\Delta \mathbf{x}$ – вектор-столбец, состоящий из Δx_i ;

$\Delta \mathbf{f}$ – несбалансированные векторы столбцов;

Подстановка $x_i^{(0)}$ в приведенное выше уравнение дает Δf , J и получается $\Delta x_i^{(0)}$, чтобы найти новое значение x_i после первой итерации:
 $x_i^{(1)} = x_i^{(0)} + \Delta x_i^{(0)}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$). Получается следующая взаимосвязь:

$$\begin{aligned} x_1^{(1)} &= x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)} \\ x_2^{(1)} &= x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)} \\ &\vdots \\ x_n^{(1)} &= x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)} \end{aligned} \quad (32)$$

Эта итерация повторяется, и уравнение коррекции решается при $k + 1$ раз

$$\begin{bmatrix} f_1(x_1^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) \\ f_2(x_1^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) \\ \vdots \\ f_n(x_1^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Big|_k & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \Big|_k & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Big|_k \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \Big|_k & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \Big|_k & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \Big|_k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Big|_k & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \Big|_k & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Big|_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(k)} \\ \Delta x_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(k)} \end{bmatrix} \quad (33)$$

Итеративный процесс продолжается до тех пор, пока не будет выполнен следующий критерий сходимости:

$$\max \left\{ \left| f_1(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) \right| \right\} < \varepsilon_1$$

$$\max \left\{ \left| \Delta x_i^{(k)} \right| \right\} < \varepsilon_2$$

При расчете с использованием этого метода следует подбирать начальные значения x_i так, чтобы они были ближе к их точному решению, иначе итерационный процесс может не сходиться. Эта ситуация кратко объясняется ниже. График функции $f(x)$ показан на рисунке 6. Модифицированное уравнение при решении $f(x) = y$ с использованием этого метода имеет вид $y - f(x^k) = \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \Big|_k \Delta x^k$. Процесс итерационного

решения в соответствии с этим модифицированным уравнением показан на рисунке от $x^{(0)}$ до $x^{(1)}, x^{(2)}, \dots$.

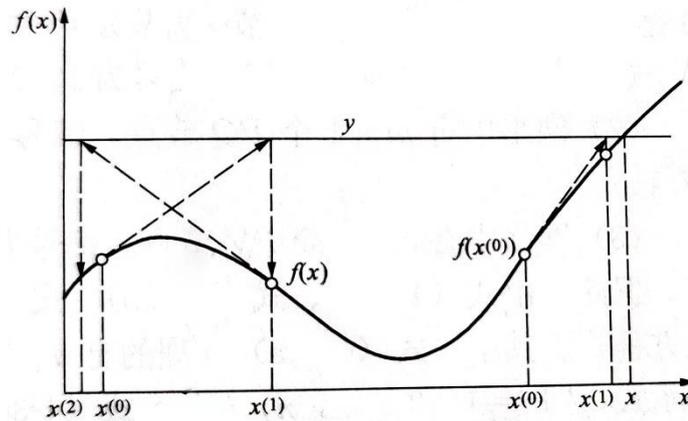


Рис 6 Процесс решения метода Ньютона-Рафтсона

Как видно из рисунка 6, если начальное значение $x^{(0)}$ выбранного x выбрано близко к его точному решению, итерационный процесс будет быстро сходиться; Иначе не сойдется.

5.1.2 Расчеты по методу Ньютона-Рафтсона в виде прямых координат

Когда используются декартовы координаты, величина, которую нужно искать в задаче потока мощности, представляет собой действительную и мнимую части напряжения каждого узла, поскольку задан вектор напряжения узла баланса, поэтому общее количество величин, которые необходимо искать, равно $2(n - 1)$, поэтому требуются $2(n - 1)$ уравнения. Фактически, за исключением уравнения мощности балансирующего узла, которое не имеет ограничений в процессе итерации, каждый узел может перечислить два уравнения.

При использовании метода Ньютона-Рафтсона уравнение мощности может быть решено напрямую:

$$\tilde{S}_i = P_i + jQ_i = \dot{U}_i I_i = \dot{U}_i \sum_{j=1}^{j=n} \dot{Y}_{ij} \dot{U}_j \quad (34)$$

Он также может быть записан как

$$(P_i + jQ_i) - \dot{U}_i \sum_{j=1}^{j=n} \dot{Y}_{ij} \dot{U}_j = 0 \quad (35)$$

Подстановка $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$, $\dot{U}_i = e_i + jf_i$ в уравнение (34).

$$(e_i + jf_i) \sum_{j=1}^{j=n} (G_{ij} - jB_{ij})(e_j - jf_j) = P_i + jQ_i \quad (36)$$

Перечислите действительную и мнимую части уравнения (36) отдельно:

$$\sum_{j=1}^{j=n} [e_i(G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + f_i(G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)] = P_i \quad (37)$$

$$\sum_{j=1}^{j=n} [f_i(G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - e_i(G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)] = Q_i \quad (38)$$

Поскольку в системе также есть PV-узлы с заданной величиной напряжения, набор уравнений также следует дополнить:

$$e_i^2 + f_i^2 = U_i^2 \quad (39)$$

Где e_i, f_i —Действительная и мнимая части напряжения узла, полученного при итерации

P_i —Вводимая активная мощность в узлы PQ и фотоэлектрические узлы

Q_i —Впрыскиваемая реактивная мощность в узел PQ

U_i —Величина напряжения узел PV

Из уравнений (41), (42) и (43) можно получить следующее уравнение:

$$\Delta P_i = P_i - \sum_{j=1}^{j=n} [e_i(G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + f_i(G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)] \quad (40)$$

$$\Delta Q_i = Q_i - \sum_{j=1}^{j=n} [f_i(G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - e_i(G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)] \quad (41)$$

$$\Delta U_i^2 = U_i^2 - (e_i^2 + f_i^2) \quad (42)$$

Для k -й итерации его можно вывести

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i - \sum_{j=1}^{j=n} [e_i^{(k)}(G_{ij}e_j^{(k)} - B_{ij}f_j^{(k)}) + f_i^{(k)}(G_{ij}f_j^{(k)} + B_{ij}e_j^{(k)})] \quad (43)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i - \sum_{j=1}^{j=n} [f_i^{(k)}(G_{ij}e_j^{(k)} - B_{ij}f_j^{(k)}) - e_i^{(k)}(G_{ij}f_j^{(k)} + B_{ij}e_j^{(k)})] \quad (44)$$

$$[U_i^{(k)}]^2 = U_i^2 - \{[e_i^{(k)}]^2 + [f_i^{(k)}]^2\} \quad (45)$$

Для всех узлов, кроме узла балансировки:

$$\Delta P_i = \sum_{j=1}^{j=n} \frac{\partial P_i}{\partial f_j} \Delta f_j + \sum_{j=1}^{j=n} \frac{\partial P_i}{\partial e_j} \Delta e_j = \sum_{j=1}^{j=n} H_{ij} \Delta f_j + \sum_{j=1}^{j=n} N_{ij} \Delta e_j \quad (46)$$

Для узлов PQ:

$$\Delta Q_i = \sum_{j=1}^{j=n} \frac{\partial Q_i}{\partial f_j} \Delta f_j + \sum_{j=1}^{j=n} \frac{\partial Q_i}{\partial e_j} \Delta e_j = \sum_{j=1}^{j=n} J_{ij} \Delta f_j + \sum_{j=1}^{j=n} L_{ij} \Delta e_j \quad (47)$$

Для узлов PV:

$$\Delta U_i^2 = \frac{\partial U_i^2}{\partial f_i} \Delta f_i + \frac{\partial U_i^2}{\partial e_i} \Delta e_i = R_{ii} \Delta f_i + S_{ii} \Delta e_i \quad (48)$$

Если в сети имеется n узлов, m узлов PQ, $n-m-1$ PV-узла и 1 узел баланса, можно переписать модифицированное уравнение, аналогичное уравнению (32)

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta U^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \\ R & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta e \end{bmatrix} \quad (49)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta P_p \\ \Delta U_p^2 \\ \Delta P_n \\ \Delta U_n^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & N_{11} & H_{12} & N_{12} & H_{1p} & N_{1p} & H_{1n} & N_{1n} \\ J_{11} & L_{11} & J_{12} & L_{12} & J_{1p} & L_{1p} & J_{1n} & L_{1n} \\ H_{21} & N_{21} & H_{22} & N_{22} & H_{2p} & N_{2p} & H_{2n} & N_{2n} \\ J_{21} & L_{21} & J_{22} & L_{22} & J_{2p} & L_{2p} & J_{2n} & L_{2n} \\ \vdots & \vdots \\ H_{p1} & N_{p1} & H_{p2} & N_{p2} & H_{pp} & N_{pp} & H_{pn} & N_{pn} \\ R_{p1} & S_{p1} & R_{p2} & S_{p2} & R_{pp} & S_{pp} & R_{pn} & S_{pn} \\ H_{n1} & N_{n1} & H_{n2} & N_{n2} & H_{np} & N_{np} & H_{nn} & N_{nn} \\ R_{n1} & S_{n1} & R_{n2} & S_{n2} & R_{np} & S_{np} & R_{nn} & S_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta e_1 \\ \Delta f_2 \\ \Delta e_2 \\ \vdots \\ \Delta f_p \\ \Delta e_p \\ \Delta f_n \\ \Delta e_n \end{bmatrix} \quad (50)$$

Элементами матрицы Якоби в уравнении (49) являются:

$$\begin{aligned} H_{ij} &= \frac{\partial P_i}{\partial f_j}; & N_{ij} &= \frac{\partial P_i}{\partial e_j}; \\ J_{ij} &= \frac{\partial Q_i}{\partial f_j}; & L_{ij} &= \frac{\partial Q_i}{\partial e_j}; \\ R_{ij} &= \frac{\partial U_i^2}{\partial f_j}; & S_{ij} &= \frac{\partial U_i^2}{\partial e_j}; \end{aligned} \quad (51)$$

Выражение выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}
H_{ij} &= \frac{\partial P_i}{\partial f_j} = L_{ij} = -B_{ij}e_i + G_{ij}f_i \\
N_{ij} &= \frac{\partial P_i}{\partial e_j} = -J_{ij} = G_{ij}e_i + B_{ij}f_i \\
H_{ii} &= \frac{\partial P_i}{\partial f_i} = -B_{ii}e_i + G_{ii}f_i + b_{ii} \\
N_{ii} &= \frac{\partial P_i}{\partial e_i} = G_{ii}e_i + B_{ii}f_i + a_{ii} \\
J_{ii} &= \frac{\partial Q_i}{\partial f_i} = -G_{ii}e_i - B_{ii}f_i + a_{ii} \\
L_{ii} &= \frac{\partial Q_i}{\partial e_i} = -B_{ii}e_i + G_{ii}f_i - b_{ii} \\
R_{ij} &= \frac{\partial U_i^2}{\partial f_j} = 0 \\
S_{ij} &= \frac{\partial U_i^2}{\partial e_j} = 0 \\
R_{ii} &= \frac{\partial U_i^2}{\partial f_i} = 2f_i \\
S_{ii} &= \frac{\partial U_i^2}{\partial e_i} = 2e_i
\end{aligned} \tag{52}$$

a_{ii} и b_{ii} в уравнении (52) являются действительной и мнимой частями тока инъекции узла (\dot{I}_i) соответственно:

$$a_{ii} = (G_{ii}e_i - B_{ii}f_i) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{j=n} (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) \tag{53}$$

$$b_{ii} = (G_{ii}f_i + B_{ii}e_i) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{j=n} (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) \tag{54}$$

Величина поправки для итераций (k+1) можно найти $\Delta e^{(k+1)}$ и $\Delta f^{(k+1)}$, что позволяет получить новое решение.

$$\begin{bmatrix} e^{(k+1)} \\ f^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{(k)} \\ f^{(k)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta e^{(k+1)} \\ \Delta f^{(k+1)} \end{bmatrix} \quad (55)$$

Расчеты повторяются до сходимости до требуемой точности

5.1.3 Расчет течения по методу Ньютона-Рафсона в виде полярных координат

Напряжение узла может быть выражено не только в декартовых координатах, но и в полярных координатах. Поэтому существует еще одна форма модифицированного уравнения для расчета течения мощности Ньютона-Рафсона — метод Ньютона-Рафтсона в виде полярных координат.

При использовании полярной формы координат $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$; $\dot{U}_i = U_i e^{j\delta_i} = U_i(\cos \delta_i + j \sin \delta_i)$; Получено узловое уравнение мощности:

$$\begin{bmatrix} e^{(k+1)} \\ f^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{(k)} \\ f^{(k)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta e^{(k+1)} \\ \Delta f^{(k+1)} \end{bmatrix} \quad (56)$$

Получены действительная и мнимая части уравнения (60)

$$P_i = U_i \sum_{j=1}^{j=n} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (57)$$

$$Q_i = U_i \sum_{j=1}^{j=n} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (58)$$

где $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ —разность фаз напряжения

Из уравнений (57) и (58) дисбаланс активной мощности ΔP_i и дисбаланс реактивной мощности ΔQ_i

$$\Delta P_i = P_i - U_i \sum_{j=1}^{j=n} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (59)$$

$$\Delta Q_i = Q_i - U_i \sum_{j=1}^{j=n} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (60)$$

Его модифицированное уравнение имеет вид:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U / U \end{bmatrix} \quad (61)$$

Элементами матрицы Якоби в уравнении (61) являются:

$$\begin{aligned} H_{ij} &= \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j}; & N_{ij} &= \frac{\partial P_i}{\partial U_j} U_j; \\ J_{ij} &= \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j}; & L_{ij} &= \frac{\partial Q_i}{\partial U_j} U_j; \end{aligned} \quad (62)$$

Выражение выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} H_{ij} &= \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = U_i U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \\ J_{ij} &= \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -U_i U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ N_{ij} &= \frac{\partial P_i}{\partial U_j} U_j = U_i U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ L_{ij} &= \frac{\partial Q_i}{\partial U_j} U_j = U_i U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \\ H_{ii} &= \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -U_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{j=n} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{aligned} \quad (63)$$

$$J_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = U_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{j=n} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij})$$

$$N_{ii} = \frac{\partial P_i}{\partial U_i} U_i = U_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{j=n} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) + 2U_i^2 G_{ii}$$

$$L_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial U_i} U_i = U_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{j=n} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) - 2U_i^2 B_{ii}$$

5.1.4 Усовершенствования метода Ньютона-Рафтсона

Для систем распределения электроэнергии обычно предполагается, что разность напряжений между соседними узлами невелика; Наземная ветвь отсутствует.

Поскольку элементы якобианской матрицы в условии (63) выше могут быть аппроксимированы как

$$H_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -U_i U_j B_{ij} \cos \delta_{ij}$$

$$J_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -U_i U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij})$$

$$N_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial U_j} U_j = U_i U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij})$$

$$L_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial U_j} U_j = U_i U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij})$$

$$H_{ii} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -U_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{j=n} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij})$$

(64)

$$J_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = U_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{j=n} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij})$$

$$N_{ii} = \frac{\partial P_i}{\partial U_i} U_i = U_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{j=n} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) + 2U_i^2 G_{ii}$$

$$L_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial U_i} U_i = U_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{j=n} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) - 2U_i^2 B_{ii}$$

H, N, J, L имеют ту же симметричную разреженность, что и узловая матрица допуска, и могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{aligned} H &= L = A_{n-1} D_B A_{n-1}^T \\ J &= -N = A_{n-1} D_G A_{n-1}^T \end{aligned} \quad (65)$$

где A_{n-1} —Система n-узлов не учитывает матрицу ассоциаций узлов-ветвей исходного узла

D_B, D_G —диагональная матрица

Таким образом, уравнение (61) может быть записано как

$$\begin{bmatrix} A_{n-1} & \\ & A_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_B & -D_G \\ D_G & D_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{n-1}^T & \\ & A_{n-1}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U/U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (66)$$

Усовершенствованный метод Ньютона-Рафтсона имеет сходимость второго порядка и может быть легко применен для оценки состояния.

5.2 Определение методов компенсации реактивной мощности и выбор местоположения

1. Определение методов компенсации реактивной мощности

В соответствии с соответствующими техническими указаниями в «Технических принципах строительства и преобразования электрических сетей», сформулированных Государственной энергетической корпорацией, и в сочетании с характеристиками радиального электроснабжения, больших нагрузок и широкого распределения, а также нескольких ветвей и однонаправленного распределения распределительной сети, оптимизация реактивной мощности I. распределительной сети подстанции должна осуществляться в соответствии со следующими принципами: «комплексное планирование, разумная компоновка, иерархическая компенсация, локальный баланс» и «сочетание централизованной компенсации и децентрализованной компенсации, в основном децентрализованной компенсации; Компенсация высокого напряжения в сочетании с компенсацией низкого напряжения, в основном компенсация низкого напряжения; Регулирование давления и снижение потерь сочетаются друг с другом, и снижение потерь — это главное».

1) Основы выбора методов компенсации реактивной мощности

Из-за радиального источника питания, большой нагрузки и широкого распределения распределительной сети, множества филиалов и однонаправленного следует выбрать децентрализованный метод компенсации и выбрать до 5 точек компенсации, что может достичь эффекта локальной компенсации и уменьшить количество точек компенсации, что удобно для установки, обслуживания и управления.

2) Конкретный метод компенсации:

При использовании компенсации на полюсе в качестве компенсационных узлов выбираются 2 ~ 5 точек, а максимальная компенсационная емкость ограничена 150 квар;

2. Выбор положения компенсации реактивной мощности

Сначала выясняется распределение реактивной мощности по всей линии с помощью расчета потока мощности, а затем выбирается несколько точек с меньшим коэффициентом мощности для компенсации полюсов.

Таблица 4 Параметры до компенсации реактивной мощности

Название строки	Напряжение узла (pu)	Фактор силы ($\cos \varphi$)
2	0.901	0.84
3	0.916	0.88
4	0.899	0.86
5	0.926	0.92
6	0.970	0.90
7	0.908	0.85
Потеря сети (kW)	82.51	

Места компенсации реактивной мощности подстанции No I и ее распределительной сети определяются следующим образом (обозначаются номерами узлов): узел 2, узел 5, узел 6.

5.3 Параметры оптимизации реактивной мощности

5.3.1 Структурный анализ эквивалента сети

1. Целевая функция

Возьмем минимальные активные потери системы в качестве цели оптимизации и конкретную целевую функцию оптимизации реактивной мощности:

$$\min f = \min \left(P_{loss} + \lambda \sum_{i=1}^{i=N} \left(\frac{U_i - U_{ilim}}{U_{imax} - U_{imin}} \right)^2 \right) \quad (67)$$

где λ —штрафной коэффициент за нарушение ограничений по напряжению, принимаем $\lambda = 1$;

U_{ilim} —предел напряжения узла i , принять $U_{ilim} = 1$;

U_{imin} —нижний предел напряжения узла i , согласно национальным правилам управления распределительной сетью, принять $U_{imin} = 0.93$;

U_{imax} —верхний предел напряжения узла I, согласно национальным правилам управления распределительной сетью, принимает $U_{imax} = 1.07$;

2. Переменные ограничения

(1) Ограничения на уравнения:

$$P_i = U_i \sum_{j=1}^{j=n} U_j (G_{ij} \cos \delta + B_{ij} \sin \delta) \quad (68)$$

$$Q_i = U_i \sum_{j=1}^{j=n} U_j (G_{ij} \sin \delta - B_{ij} \cos \delta) \quad (69)$$

где P_i —инжектируемая активная мощность узла i;

Q_i —инжектируемая реактивная мощность узла I;

G_{ij} —проводимость между узлами i и j;

B_{ij} —электричество между узлами i и j;

δ —разность фазовых углов напряжения;

(2) Переменные ограничения

Ограничения на управляющие переменные:

$$Q_{Cjmin} \leq Q_{Cj} \leq Q_{Cjmax}, \quad j \in N_C$$

Ограничения для переменных состояния:

$$U_{Ljmin} \leq U_{Lj} \leq U_{Ljmax}$$

$$I_{Ljmin} \leq I_{Lj} \leq I_{Ljmax}, \quad j \in N_L$$

где Q_{Cj} —величина компенсации реактивной мощности на j-узле;

U_{Lj} —напряжение ветви J;

I_{Lj} —ток ветви J;

N_C —точка компенсации реактивной мощности;

N_L —сбор номеров филиалов;

5.3.2 Выполняемый процесс

1. Определите, как кодируются хромосомы

В данной работе компенсация реактивной мощности осуществляется путем автоматического переключения групповых параллельных конденсаторов, где компенсационная емкость одной группы конденсаторов фиксирована, а нашей управляющей переменной является количество групп компенсационных конденсаторов, поэтому в данной работе при оптимизации реактивной мощности применяется генетический алгоритм кодирования хромосом десятичным кодированием. Индивидуальная длина кодирования — это количество управляющих переменных, то есть количество компенсационных узлов, а диапазон значений каждого отдельного значения гена — это верхний и нижний пределы управляющих переменных, который также является верхним и нижним пределами числа групп компенсационных конденсаторов. Десятичное кодирование, согласно описанию актуальной проблемы, сокращает процесс декодирования и упрощает операцию; Кроме того, десятичное кодирование уменьшает длину хромосом и пространство поиска по сравнению с двоичным кодированием, что значительно повышает эффективность оптимизации.

Для компенсации узла 6, узла 9 и узла 10 компенсационная емкость одной группы конденсаторов определяется равной 35 квар, и если хромосомы после десятичного кодирования представлены как $X = [5 \ 3 \ 2]$, количество компенсационных групп конденсаторов, представляющих эти три узла, равно 5 группам, 3 группам и 2 группам, тогда компенсационная емкость каждого узла составляет 175 квар, 105 квар и 70 квар соответственно.

Таким образом, хромосомный код особи может быть выражен как:

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$$

Контролируемая компенсационная емкость составляет:

$$Q_{ci} = x_i^* \Delta Q_{ci} \tag{70}$$

где n —Количество узлов компенсации реактивной мощности;
 Q_{ci} —реактивная мощность, компенсируемая узлом i ;
 x_i —Количество компенсационных групп, инвестированных узлом i ;
 ΔQ_c —Компенсационная емкость одной группы конденсаторов;

2. Создание инициализированных популяций

Статистические данные показывают, что чем лучше дисперсия исходной популяции в пространстве растворов, тем легче генетическому алгоритму достичь глобального оптимума. Следовательно, в данной работе начальная популяция случайным образом генерируется в пространстве решений, что реализуется случайной функцией $\text{rand}()$, так что хромосомы в исходной популяции появляются в пространстве решений с одинаковой вероятностью, что увеличивает дисперсию, улучшает алгоритм сбора и быстро достигает глобальной оптимальной вероятности решения.

3. Фитнес-функция особи

Во-первых, согласно принципу генетического алгоритма, задача нахождения минимального значения целевой функции трансформируется в задачу нахождения максимального значения функции приспособленности посредством последующего преобразования.

$$F = A/f \quad ()$$

где A —коэффициент усиления, $A=1000$;

f —целевая функция;

Следовательно, каждый индивидум соответствует значению фитнес-функции, и чем выше значение, тем лучше качество этого индивидуума как решения. Это означает, что чем больше индивидум подходит к определенной среде обитания, что отражается в работе алгоритма, для того, чтобы гарантировать, что превосходные генетические характеристики передаются генетически, нам необходимо увеличить вероятность того, что индивидуум войдет в следующее поколение эволюции.

4. Определите оператор выбора

В соответствующей литературе общий принцип выбора прост, а простой в эксплуатации метод рулетки является оптимальной стратегией выбора, но легко вызвать проблему «скороспелости» после тестирования. Таким образом, в данной работе используется метод двухпарной конкуренции, принцип которого заключается в случайном выборе двух особей из родительской популяции, сначала сравнении значений каждой адаптивной функции степени, а затем сохранение отличных особей и отсеивание бедных особей. Случайный выбор метода гарантирует, что особи имеют хорошую дисперсию в пространстве раствора, а сравнительный отбор метода обеспечивает лучшую адаптацию потомков.

5. Предустановленные вероятности кроссовера и мутации

Перекрестная операция является основным шагом в генетическом алгоритме для создания новых особей, и она определяет глобальную поисковую способность генетического алгоритма. В этой статье метод одноточечного кроссовера используется для того, чтобы сначала случайным образом сгенерировать положение одноточечного пересечения каждой пары парных особей, а затем перекрестной подстановки. Случайность таких пересечений делает возможность обмена генными точками у парных особей равной, что способствует передаче отличной генетической информации следующему поколению посредством кроссовера, так что отличные черты могут быть унаследованы.

Мутационные операции также являются важным шагом в генерации новых особей, которые тесно связаны с возможностями локального поиска алгоритма. В статье используется метод дискретной вариации, то есть для индивидуумов в текущей популяции каждый элемент мутирует с определенной вероятностью. Вероятность вариации текста равна 0,1.

6. Предустановленные критерии прекращения

В данной работе алгоритму задаются два критерия завершения: критерий завершения внутреннего цикла заключается в достижении числа

итераций, а разница между оптимальным решением и последним оптимальным решением по критерию завершения внешнего цикла меньше допустимой погрешности, и оба критерия могут завершить процесс итерации. То есть искать оптимальное решение в пределах заданного достаточно большого диапазона генетической алгебры, и определять, является ли оптимальное решение определенного поколения лучшим по толерантности, в противном случае выход из эволюции, да, продолжение поиска до тех пор, пока толерантность не будет удовлетворена. Если в максимальной генетической алгебре не найдено оптимального решения, удовлетворяющего толерантности, то получается субоптимальное решение.

В генетическом алгоритме, приведенном в данной работе, число популяции равно 50, а генетическое поколение равно 100: условие прекращения устанавливается как 10 поколений или достигает максимальной генетической генерации оптимального решения определенного поколения.

5.4 Анализ процесса оптимизации реактивной мощности и результатов на основе генетического алгоритма

Параметры распределительной сети, введенные в эту блок-схему, включают: коэффициент распределительного трансформатора, импеданс распределительной линии; Мощность рабочей нагрузки каждого узла, количество коммутационных конденсаторов, а также верхний и нижний пределы напряжения узла.

Вводя вышеуказанные параметры, описывается структура сетки и рабочее состояние распределительной сети.

Блок-схема оптимизации реактивной мощности на основе генетического алгоритма показана на рисунке 7.

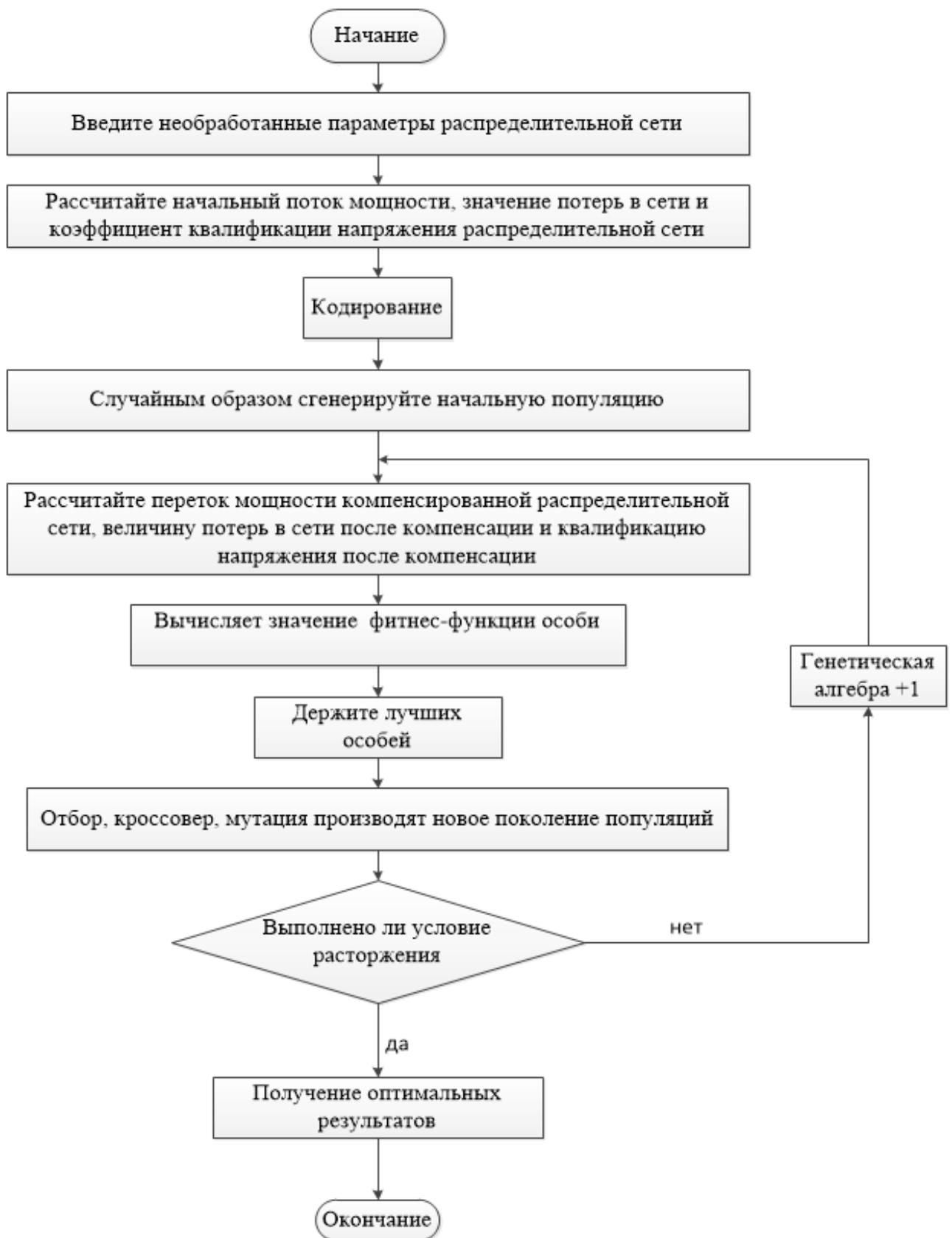


Рис 7 Блок-схема оптимизации реактивной мощности на основе генетического алгоритма

В соответствии с приведенными выше условиями конфигурации параметров оптимизации реактивной мощности компенсационная емкость распределительной сети определяется генетическим алгоритмом при определении положения узла компенсации.

После расчета программы конфигурация емкости компенсации реактивной мощности показана в следующей таблице.

Таблица 5 Конфигурация емкости компенсации реактивной мощности

Номер узла	Количество компенсационных групп	Компенсированная емкость
6	4	140
9	3	105
10	5	175

Вместимость одной группы 35kvar

Компенсация до и после показана в таблице 6 и таблице.

Таблица 6 Параметры до компенсации реактивной мощности

Название строки	Напряжение узла (pu)	Фактор силы ($\cos \varphi$)
2	0.901	0.84
3	0.916	0.88
4	0.899	0.86
5	0.926	0.92
6	0.970	0.90
7	0.908	0.85
Потеря сети (kW)	82.51	

Таблица 7 Параметры после компенсации реактивной мощности

Название строки	Напряжение узла (pu)	Фактор силы ($\cos \varphi$)
2	0.946	0.95
3	0.953	0.97
4	0.933	0.96
5	0.996	0.94
6	0.985	0.95
7	0.973	0.86
Потеря сети (kW)	46.20	

Из таблиц 6 и 7 видно, что после того, как генетический алгоритм определяет компенсацию реактивной мощности, потери в системной сети значительно снижаются, коэффициент мощности относительно улучшается, а напряжение каждого узла увеличивается. Соответствовать требованиям.

При нормальной работе энергосистемы потери в сети неизбежны, помимо использования регулирования реактивной мощности для снижения потерь в сети, также могут использоваться следующими способами[53, 55]:

1. Улучшить режим работы сети

Режим работы электросетевой системы оказывает важное влияние и регулирующее воздействие на экономическую эксплуатацию электросети. Долгое время вопрос о том, как добиться гармоничной интеграции коэффициента безопасности и экономической эксплуатации, был важной проблемой, от которой страдают энергоснабжающие предприятия. В настоящее время, когда экономическая эксплуатация является важной стратегией, исходя из предпосылки обеспечения безопасности оборудования, в соответствии с параметрами трансформатора и потреблением энергии, руководствуясь различными периодами энергопотребления, нарисуйте кривую потерь энергии трансформатора, узнайте пиковую точку значения нагрузки на кривой потерь энергии, обратите внимание на различные кривые

среды передачи в процессе построения кривой, после того, как кривая нарисована, строго в соответствии с кривой разумного распределения главного трансформатора для достижения оптимальной конфигурации. Практика показывает, что этот режим работы электросети очень эффективен для снижения потерь энергии, повышения экономической работоспособности электросети, а потери в сети были значительно снижены по сравнению с традиционным режимом, эффективно экономя потери электроэнергии, снижая эксплуатационные расходы предприятий и улучшая экономические выгоды предприятий.

2. Проводите регулярный осмотр и техническое обслуживание системы электросетей.

Даже когда электросеть находится в нормальном режиме, ее необходимо регулярно обслуживать и обслуживать. При нормальных обстоятельствах, когда электросеть находится в процессе нормальной работы, система безопасна и надежна, когда возникает локальная неисправность, значение энергопотребления всей системы увеличивается, поэтому персонал должен уделять пристальное внимание различным функциональным областям системы электросети, своевременно находить неисправности, своевременно устранять, чтобы гарантировать, что система на основе нормального источника питания с низкими потерями.

В соответствии с требованиями надежности и безопасности электроснабжения необходимо единообразно расположить и проверить питающее оборудование с различными уровнями напряжения, чтобы обеспечить планирование и надежность технического обслуживания и проверки, обеспечить управленческий контроль, сократить цикл технического обслуживания, предотвратить перебои в подаче электроэнергии и обеспечить минимальные потери электроэнергии. Для района Канчэн электросеть очень сложна, и использование кольцевого режима электроснабжения может быть очень эффективным для удовлетворения сложного спроса на электросеть. При столкновении с конструкцией определенной линии электроснабжения

нагрузка может быть успешно перенесена на другую линию через разумное замыкающее кольцо, обеспечивая нормальную работу системы электроснабжения.

Например, для подстанции 110 кВ, когда ток нагрузки превышает 140 А, добавляется главный трансформатор, который будет использоваться и работать параллельно. В этом случае два трансформатора могут обеспечить нормальную работу одновременно, эффективно увеличить напряжение, повысить мощность электросети электросети, когда другой трансформатор вводится в эксплуатацию, напряжение может быть мгновенно увеличено на 1100 кВт, а его выработка электроэнергии эквивалентна энергии электропитания трансформаторной подстанции 40 кВ. Таким образом, этот режим работы электросети может эффективно снизить потери в сети и является мощной мерой по повышению экономической работоспособности электросети.

3. Усилить управление предприятием и популяризировать концепцию снижения потерь и энергосбережения

Успешное управление предприятием создает успешные предприятия, что является неизменным выводом, поэтому для системы электросетей усиление управления предприятием является важной мерой для достижения важной экономической эксплуатации электросети. В процессе управления обращайтесь внимание на людей, обращайтесь внимание на важность каждого сотрудника, каждой должности, постоянно улучшайте концепцию энергосбережения и осведомленность сотрудников о снижении потерь в целом и работайте в строгом соответствии с их соответствующими должностными обязанностями. Чтобы действительно уменьшить потери в сети, может быть создана специальная энергосберегающая команда, которая разделит энергосберегающую работу линии на несколько частей, будет управлять ими отдельно, возложить ответственность на людей и строго нести ответственность за отклонения от нормы. Усилить обучение сотрудников на рабочем месте, обеспечить, чтобы сотрудники были сертифицированы для

работы, и обратить внимание на повышение способности транспортных работников справляться с нештатными ситуациями, а также свести к минимуму потери электросети на основе обеспечения нормальной работы электросети.

Например, при проведении преобразования городской электросети необходимо провести фактическое исследование и обследование мест, где проходит линия, таких как столкновение с важными государственными органами, школами, больницами и другими важными ведомствами, попытаться объехать, немедленно скорректировать план, осуществить секционное строительство, трансформацию с разделением времени, чтобы избежать слишком долгих отключений электроэнергии в важных отделах и повлиять на нормальную социальную жизнь, чтобы свести к минимуму социальные интересы и экономические интересы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с текущими проблемами больших активных потерь в сети, низкого качества напряжения и низкого коэффициента мощности в распределительной сети подстанции No I в реальной эксплуатации, в данной работе используется схема оптимизации реактивной мощности, основанная на генетическом алгоритме, для оптимизации и улучшения рабочего состояния распределительной системы, и получены следующие основные выводы:

1. Предложенная в данной работе целевая функция оптимизации реактивной мощности с наименьшими потерями в активной сети и наивысшим качеством напряжения устанавливается путем взятия в качестве примера подстанции No I и объединения фактической работы распределительной сети в этом районе. Результаты показывают, что ожидаемый эффект энергосбережения и снижения потерь может быть достигнут, а эффективность предприятий может быть улучшена, а математическая модель оптимизации реактивной мощности соответствует действительности.

2. При расчете потока мощности, в соответствии с фактическим положением структуры распределительной сети, для расчета потока мощности выбирается улучшенный метод Ньютона-Рафтсона, который обладает высокой вычислительной мощностью и высокой точностью расчета для системы.

3. В соответствии с фактической работой подстанции No I предложенный алгоритм оптимизации реактивной мощности используется для расчета оптимальной точки компенсации и оптимальной компенсационной емкости конфигурации конденсатора компенсации реактивной мощности. Из результатов оптимизации видно, что активные потери распределительной сети эффективно снижаются, качество напряжения значительно улучшается, а безопасность эксплуатации линии и экономические выгоды предприятия улучшаются, что доказывает, что алгоритм оптимизации реактивной мощности имеет большое практическое применение.

Перспективы работы по оптимизации реактивной мощности:

Модель оптимизации реактивной мощности и алгоритм генетической оптимизации в этом разделе основаны на сочетании предыдущей работы реактивной мощности и реальной ситуации в регионе. Анализ оптимизации реактивной мощности в этой статье только открывает начало будущей оптимизации реактивной мощности распределительной сети, и в будущем ее необходимо улучшать и усердно работать во многих аспектах. С ускорением развития автоматизации распределительных сетей проблема оптимизации реактивной мощности в новых условиях будет становиться все более востребованной и заметной, а перспективы исследований – очень широкими.

С исследовательской точки зрения оптимизация реактивной мощности является типичной нелинейной проблемой условий с несколькими ограничениями, как обеспечить как экономические выгоды, так и качество напряжения, как обеспечить производительность управления реактивной мощностью в реальном времени на основе достаточной точности расчетов, они должны интегрировать все аспекты проблемы для общего рассмотрения, заслуживают нашего продолжения углубленных исследований. На данном этапе теория оптимизации реактивной мощности появляется одна за другой, и как можно скорее применить последние достижения к распределительной сети в этом районе - это проблема, которую следует изучить и изучить. Только эффективно сочетая теорию и практику, работа по оптимизации реактивной мощности может быть эффективной, постоянно углубляться и обеспечивать безопасную, стабильную и экономичную работу распределительной сети, чтобы внести большой вклад в здоровое развитие распределительной сети в этом районе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ван Чжэнфэн. Реактивная мощность и работа энергосистемы [М]. Пекин: Китай Электрик Пресс, 2009. 1-86.
2. Ван Яньхуэй, Ван Цзинминь. Оценка рисков безопасности энергосистемы и управление чрезвычайными ситуациями [М]: Китай Пресс для контроля качества, 2017: 92-93.
3. Chebbo A M, Irving M R, Sterling M J H. Reactive power dispatch incorporating voltage stability[J]. IEE Proceedings-C, 1992, 139(3): 253-260
4. Чжэн Шуцюань. Промышленные интеллектуальные технологии и приложения [М]. Шанхай: Шанхайская научно-техническая пресса, 2019: 250-251.
5. Тао Цзинхуэй, Ван Шэнсюй, Сюй Бяо. Интеллектуальная стратегия оптимизации управления контейнерным портом [М]: Китай Форчун Пресс, 2016: 61-63.
6. Ли Дейи, Юй Цзянь, Китайское общество инженерной разведки. Введение в искусственный интеллект в серии информационных технологий нового поколения Китайской ассоциации науки и технологий [М]. Пекин: Китайская научно-техническая пресса, 2018: 73-82.
7. Лю Гуйлун, Ван Вэйцин, Чжан Синьянь, Цай Цзинцин. Обзор алгоритмов оптимизации реактивной мощности[J]. Энергосистема и чистая энергия, 2011, (01): 4-8.
8. Го Яо, Сюй Чуньяо. Обзор алгоритмов оптимизации реактивной мощности энергосистемы. 《CNKI》, 2016
9. Кэ Гохуа, Чэнь Синьхэ, Чжоу Ци и др. Обзор алгоритма оптимизации реактивной мощности энергосистемы [J]. Электромеханическая информация, 2022: 83-85.
10. Чжоу Цзюнь. Динамическая оптимизация реактивной мощности новой энергосистемы сверхвысокого напряжения на основе квантово-

генетического алгоритма[J].Северо-восточная электроэнергетика, 2022,43(09):10-14+46.

11. Дун Анг, Хуан Юэ. Анализ текущей ситуации оптимизации реактивной мощности традиционной энергосистемы[J].Science and Technology Wind,2019,No.404(36):187.

12. Лю Хун. Анализ контрмер по оптимизации реактивной мощности и компенсации реактивной мощности энергосистемы [J].Low Carbon World, 2017: 98-99.

13. Фу Гошань, Чжан Айго. Практический метод и применение стратегии управления эксплуатацией региональной энергосистемы и оптимизацией реактивной мощности [J]. Информация о науке и технике провинции Хэйлунцзян, 2014(32):160.

14. Лю Сяоли, Ван Бинь. Проектирование системы оптимизации реактивной мощности для распределительной сети на основе оптимизации реактивной мощности всей сети[J].Электронные технологии и программная инженерия, 2016, No.79(05):238.

15. Тянь Ихэн, Жэнь Юн. Анализ состояния применения системы оптимизации реактивной мощности в региональной энергосистеме [J]. Образование в области электроэнергетики в Китае, 2011, No.217(30):139-140.)

16. Дун Цзе. Анализ состояния исследований оптимизации реактивной мощности распределительной сети с распределенным источником энергии[J]. Электричество для масс, 2019,34(12):23-24.

17. Лю Цинпин, Цзоу Цинъюань, Чжоу Цзиньли. Оптимизация реактивной мощности энергосистемы и стратегия управления компенсацией реактивной мощности [J].Электронные технологии и программная инженерия, 2016, No 97 (23): 243.

18. Лю Сяофэй. Дискуссия о методе анализа рациональности метода линейного программирования в промышленном планировании [J].Энергетика и окружающая среда, 2021, No 166 (03): 104-105 + 108.

19. Ли Чжаньпэн, Лю Минбо. Практический алгоритм линейного программирования для оптимизации реактивной мощности крупномасштабной энергосистемы [J]. Технология передачи и преобразования энергии провинции Гуандун, 2010,12(05):1-4+9.

20. Чун Цяопин. Обзор алгоритмов оптимизации реактивной мощности для энергосистемы [J].Электрический переключатель, 2007 (5): 16-43.

21. Чжао Ди, Юань Лян, Юань Цзунхуэй. Обзор оптимизации реактивной мощности энергосистемы [J]. Образование в области электроэнергетики в Китае, 2008 (S3): 520-522.

22. Е Цзявэй, Ван Пейхун, Чжан Мяомяо и др. Исследование распределения оптимизации нагрузки на основе динамического программирования скользящей оптимизации[J].Технология паровых турбин, 2022,64(01):6-9+15.

23. Ван Яньсун, Сунь Гуйлун, Цао Минчжи. Исследование оптимального планирования соединительной линии распределительной сети на основе метода динамического программирования [J].Защита и управление энергосистемой, 2016,44(10):30-36.

24. Ван Яньсун, Сунь Гуйлун, Цао Минчжи. Исследование оптимального планирования соединительной линии распределительной сети на основе метода динамического программирования [J].Защита и управление энергосистемой, 2016,44(10):30-36.

25. Чжан Цзе, Чжэн Юняо, Лю Шэнчунь и др. Алгоритм оптимизации динамической реактивной мощности региональной энергосистемы на основе метода развязки внутренних точек и метода смешанного целочисленного программирования[J].Electric Power,2023,56(01):112-118.

26. Сюй Дань, Сиа Шаолян, Дин Цян и др. Решение крупномасштабной задачи комбинации единиц на основе эвристического метода смешанного целочисленного программирования[J].Power System Protection and Control,2012,40(21):1-6+13.

27. Ся Миншэн. Метод оценки рисков релейной защиты на основе нечеткого алгоритма[J]. Управление энергетическим оборудованием, 2021, No.52(01):47-49.

28. Е Чжизун. Исследование технологии допустимой пропускной способности линии передачи на основе нечеткого алгоритма [J]. Проектирование электроники, 2020, 28(23):125-128+133.

29. Лю Цзе, Цзя Боянь, Гэн Цзянхай и др. Модель раннего предупреждения о риске линии передачи на основе многоуровневого нечеткого алгоритма[J]. Электронный мир, 2019, No.559(01):13-14+17.

30. Ши Юда. Оптимизация реактивной мощности распределительной сети на основе улучшенного генетического алгоритма[D]. Северо-восточный сельскохозяйственный университет, 2022 г.

31. Ван Тифан. Компьютерная генетика: модель сетевого доверия, основанная на семейных генах [M]. Пекин: Издательство интеллектуальной собственности, 2016: 93-94.

32. Тан Фэнлэй, Чэнь Хао, Чжан Чжаоцзюнь и др. Метод расчета квадратичной циркуляции ММС на основе имитационной оптимизации отжига [J]. Журнал Южно-Центрального университета национальностей (издание естественных наук), 2019, 38 (01): 100-106.

33. Хань Чанвэй, Ван Цзинхун, Гао Бо и др. Применение метода аналогового отжига в оптимальной конструкции конденсатора связи [J]. Electrical Abstracts, 2011, No.262(02):49-52.

34. Цзинь Исюн, Чэн Хаочжун, Янь Цзяньюн и др. Современный эвристический алгоритм и его применение при планировании расширения передающей сети [J]. Восточно-Китайская электроэнергетика, 2005(08):19-25.

35. Ян Хуэй. Исследование системы экспертной диагностики автоматических выключателей SF6 на основе нечеткой нейронной сети[J]. Автоматизация и контрольно-измерительные приборы, 2015, No.184(02):83-84+88.

36. Ван Цзидун, Сун Цимин, Ли Цзифан. Оптимальная работа микросети на основе многоагентного алгоритма роя хаотических частиц [J]. Возобновляемые источники энергии, 2022,40(04):513-519.

37. Дэн Цинтан, Ху Даньэр, Цай Тяньтянь и др. Стратегия оптимизации реактивной мощности распределительной сети, основанная на глубоком обучении множественных агентов с подкреплением [J]. Передовые технологии электротехники и энергетики, 2022,41(02):10-20.

38. Цзян Вэньци, Чжан Хуамэй, Ван Сянфу. Исследование двумерного плоского массива на основе хаотического генетического алгоритма [J]. Применение электронных технологий, 2023,49(04):68-72.

39. Ду Чжэньхуа, Цао Чжэньюй, Доу Рубин и др. Исследование энергосберегающей стратегии оптимизации системы распределения электроэнергии на основе генетического алгоритма с несколькими группами [J]. Энергоэффективность зданий (китайский и английский), 2023,51(03):119-122.

40. Сюй Вэй, Линь Юээ, Чжан Ся. Применение генетического алгоритма при планировании оптимизации расширения сети передачи [J]. Проектирование электроники, 2023,31(01):39-44+49.

41. Сяо Хунгуан, Ян Лу, Го Юнсинь. Идентификация неисправностей релейной защиты интеллектуальных сетей на основе адаптивного генетического алгоритма [J]. Автоматизированные контрольно-измерительные приборы, 2022,43(07):51-54.

42. И Чуньлэй, Чай Лянмин, Ван Шию и др. Исследование компенсации реактивной мощности сельской распределительной сети на основе улучшенного хаотического генетического алгоритма [J]. Электрическая автоматизация, 2022,44(04):40-43.

43. Ли Инфэн, Ши Стерншоу, К. У. Чэньинь и др. Исследование влияния распределенного доступа к электроэнергии на потери в распределительной сети [J]. Электротехнические технологии, 2022, No.572(14):160-163.

44. Лю Гуйлун, Ван Вэйцин, Чжан Синьянь, Цай Цзинцин. Обзор алгоритмов оптимизации реактивной мощности[J]. Энергосистема и чистая энергия, 2011, (01): 4-8.

45. Фан Кай, Ху Дэцзянь, Ян Гуан. Скоординированная оптимизация реактивной мощности передающей и распределительной сети, подключенной к распределенному источнику питания [J].Журнал Аньхойского профессионально-технического колледжа электроники и информации, 2022,21(05):7-13.

46. Ван Цзехун, Ли Куньхуа, Яо Чао и др. Исследование оптимизации реактивной мощности распределительной сети с улучшенным генетическим алгоритмом [J].Электронные устройства, 2020, 43 (04): 767-770.

47. Чжоу Цзянь, Дун Вэйгуан, Чжун Цзяньвэй и др. Оптимизация реактивной мощности распределительной сети на основе улучшенного алгоритма роя частиц [J].Технология Интернета вещей, 2020,10(01):33-35+39.

48. Ма Йонг. Применение силового электронного трансформатора в оптимизации реактивной мощности активной распределительной сети [J].Jue, 2018, No.121(02):115-116.

49. Ван Чуньмэн, Ту Евэй, Ся Цянфэн и др. Исследования по оптимизации реактивной мощности низковольтных распределительных сетей[J].Современная экономика промышленности и информатизация, 2017,7(20):11-15.

50. Ли Пэн, Пэн Минфан. Оптимизация реактивной мощности энергосистемы ветряных электростанций на основе улучшенного генетического алгоритма[J].Современные электронные технологии, 2020,43(13):167-171+175.

51. Ву Хао. Исследование многокритериальной оптимизации реактивной мощности на основе генетического алгоритма гибридного кодирования [D].Сельскохозяйственный университет Внутренней Монголии, 2020 г.

52. Цзтнь Сян, Ван Вэй. Анализ мер по управлению потерями в линиях и снижению потерь в распределительной сети 10 кВ [J]. Применение интегральных схем, 2023,40(03):236-237.

53. Цзтнь Тао. Обсуждение стандартизированной системы планирования и проектирования распределительной сети на основе интеллектуальных сетей [J]. Приложение автоматизации, 2022 (12): 141-143.

54. Тянь Тонг. Предварительное исследование влияния переменных управления энергосистемой на потери в сети и смещение напряжения [J]. Проектирование оборудования в Китае, 2022, No.496(08):181-182.

55. Цзян Дашу, Тун Сяомин. Исследование по сокращению потерь и энергосбережению за счет диспетчеризации экономической эксплуатации электросетей [J]. Передовые технологии, 2012 (09).

56. Чэнь Вушэн, Чжан Фучжу. Краткое описание снижения экономических потерь в электросетях и энергосберегающих технологий [J]. Электроэнергетическая наука и технологии, 2011 (08).

57. Чжао Лэй, Лу Ян, Ву Лицзюань. Анализ неисправностей и контрмер в технологии распределительной сети 10 кВ [J]. Электронные технологии, 2023,52 (03): 186-187.

ПРИЛОЖЕНИЕ А ПРОГРАММА ОПТИМИЗАЦИИ
РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО
АЛГОРИТМА

```
net = struct();
net.node_num = 6;
net.branch_num = 5;
net.node_voltage = [0.902 0.915 0.899 0.926 0.971 0.907];
net.branch_impedance = [0.123 0.355 0.0021 0.3623 0.0478 0.0116];
save net.mat net
X = [0.123 0.355 0.0021 0.3623 0.0478 0.0116];
P = [320 200 150 250 490 150];
Q = [200 180 90 110 240 95];
V = [0.902 0.915 0.899 0.926 0.971 0.907];
C = 1e-6; % 电容值为 1uF
L = [0.2 0.3 0.1 0.4 0.25 0.15];

Y = 1./(X + 1i./(2*pi*50*C) + 2*pi*50*L);
Ybus = [Y(1)+Y(2)+Y(3) -Y(2) -Y(3); -Y(2) Y(2)+Y(4)+Y(5) -Y(5); -Y(3) -Y(5)
Y(3)+Y(5)+Y(6)];
Vbus = [0.902; 0.915; 0.899];
Sbus = Vbus.*conj(Ybus*Vbus);
Pbus = real(Sbus);
Qbus = imag(Sbus);
Qd = [Qbus(1)-Q(1); Qbus(2)-Q(2); Qbus(3)-Q(3)];
N = 50;
G = 100;
pc = 0.8;
pm = 0.1;
Qmax = 150;
```

```

L = 6;
node = 1:L;
Qd = [0,-30,-40,-50,-60,-70];

```

f = @(Qc) sum((Qd+Qc).^2) + loss(net,Qc); 义的函数，用来计算无功损耗

```

pop = randi([0,Qmax],N,L);

```

```

fit = zeros(N,1);

```

```

for i = 1:N

```

```

    fit(i) = f(pop(i,:));

```

```

end

```

```

g = 1;

```

```

count = 0;

```

```

while g <= G && count < 10

```

```

    newpop = zeros(N,L);

```

```

    for i = 1:N/2

```

```

        r1 = randi(N);

```

```

        r2 = randi(N);

```

```

        if fit(r1) < fit(r2)

```

```

            newpop(2*i-1,:) = pop(r1,:);

```

```

        else

```

```

            newpop(2*i-1,:) = pop(r2,:);

```

```

        end

```

```

        r3 = randi(N);

```

```

        r4 = randi(N);

```

```

        if fit(r3) < fit(r4)

```

```

            newpop(2*i,:) = pop(r3,:);

```

```

else
    newpop(2*i,:) = pop(r4,:);
end

end

for i = 1:N/2
    if rand < pc
        cpoint = randi(L-1);
        temp1 = newpop(2*i-1,cpoint+1:L);
        temp2 = newpop(2*i,cpoint+1:L);
        newpop(2*i-1,cpoint+1:L) = temp2;
        newpop(2*i,cpoint+1:L) = temp1;
    end
end

for i = 1:N
    if rand < pm
        mpoint = randi(L);
        newpop(i,mpoint) = randi([0,Qmax]);
    end
end

pop = newpop;
for i = 1:N
    fit(i) = f(pop(i,:));
end

```

```

[bestfit(g),bestindex] = min(fit);
bestsol(g,:) = pop(bestindex,:);

if g > 1 && bestfit(g) == bestfit(g-1)
    count = count + 1;
else
    count = 0;
end

g = g + 1;

end

fprintf('最优解为: \n');
disp(bestsol(end,:));
fprintf('最优适应度值为: \n');
disp(bestfit(end));

plot(1:length(bestfit),bestfit,'b-','LineWidth',2);
xlabel('迭代次数');
ylabel('适应度值'); % 设置 y 轴标
title('遗传算法求解无功补偿优化问题');

```