

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Рубцов К.Д., студент гр. СОД.1-19-1, V курс

Иванов Д.С., студент гр. СОД.1-19-1, V курс

Брюханов Д.А., студент гр. СОД.1-19-1, V курс

Научный руководитель: Кронгауз Д.Э., к.т.н., доцент
Красноярский институт железнодорожного транспорта -
филиал Иркутского государственного университета путей
сообщения (КрИЖТ ИрГУПС)
г. Красноярск

В современном мире, где энергетика играет ключевую роль в развитии экономики и обеспечении комфорта жизни, оптимизация распределения реактивной мощности в электрических сетях становится всё более актуальной задачей. Реактивная мощность необходима для компенсации потерь активной мощности в электрических системах. Её рациональное распределение позволяет улучшить качество электроэнергии, снизить потери и повысить эффективность работы энергетических систем.

Для усиления системы тягового электроснабжения (СТЭ) сравнительно малыми затратами используются установки поперечной ёмкостной компенсации реактивной мощности на постах секционирования (ПС) или на тяговых подстанциях (ТП). Они компенсируют реактивную мощность в тяговой сети (ТС) и повышают напряжение на токоприёмнике электроподвижного состава (ЭПС), что повышает пропускную способность расчётного участка.

В связи с этим целью исследования является: разработка алгоритма управления мобильными устройствами для оптимизации распределения реактивной мощности в электрических сетях. Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математические модели и методы решения многоцелевой оптимизации для распределения реактивной мощности в электрических сетях;
2. Создать критерии определения оптимальных решений по степени компенсации реактивной мощности;
3. Оценка практической применимости и эффективности предложенного алгоритма на реальных данных.

Научная новизна проведённого исследования заключается в переходе от традиционных подходов оптимизации распределения реактивной мощности к многоцелевой оптимизации с учётом различных критериев и ограничений. Проведённое исследование позволит повысить точность и практичность решений, а также учесть реальные условия работы энергетических систем нашей страны.

1. Для разработки математической модели и методов решения многоцелевой оптимизации для распределения реактивной мощности в электрических сетях будет применяться язык программирования Python (с использованием библиотеки для анализа энергетических систем PyPSA). Далее необходимо:

- А) Создать сеть с генерацией, трансформаторами и нагрузками;
- Б) Добавить источники реактивной мощности (например, конденсаторные установки);

- В) Задать параметры сети (напряжение, ток, потери и так далее);
- Г) Оптимизировать распределение реактивной мощности;
- Д) Решить оптимизацию и получить оптимальные значения реактивной мощности для каждого устройства.

Код предложенного исследования представлен на рисунке 1.

```
1 import pypsa as ps
2 import numpy as np
3
4 # Создаем сеть с генерацией, трансформаторами и нагрузками
5 net = ps.Network()
6
7 # Добавляем источники реактивной мощности (например, конденсаторные установки)
8 net.add_devices(qs=100, qs_type='capacitor')
9
10 # Задаем параметры сети (напряжение, потери и т.д.)
11 net.set_parameters(voltage_magnitudes=1200, losses=1e-3)
12
13 # Оптимизируем распределение реактивной мощности
14 opt = net.opt(qs)
15
16 # Решаем оптимизацию
17 opt.solve()
18
19 # Получаем оптимальные значения реактивной мощности для каждого устройства
20 optimal_qs = opt.get_opt_values('qs')
21
22 print("Optimal reactive power distribution:")
23 print(optimal_qs)
```

Рисунок 1 – Разработка математической модели многоцелевой оптимизации для распределения реактивной мощности в электрических сетях

2. Критерии определения оптимальных решений по степени компенсации реактивной мощности могут быть следующими:

- А) Минимум потерь электроэнергии в электрической сети: критерий основан на минимизации потерь электроэнергии в сети, вызванных перетоками реактивной мощности;
- Б) Минимум суммарных приведённых затрат: критерий, при котором учитываются все затраты, связанные с установкой и эксплуатацией компенсирующих устройств, и выбирается вариант с наименьшими суммарными затратами;
- В) Максимальное использование конденсаторных установок: критерий, направленный на максимальное использование установленных конденсаторных установок, чтобы снизить затраты на их приобретение и эксплуатацию;
- Г) Учёт графика электрической нагрузки: критерий, который учитывает пиковые и полупиковые зоны графика нагрузки предприятия и выбирает оптимальный способ компенсации реактивной мощности для каждой зоны;
- Д) Учёт коэффициентов использования оборудования: критерий, учитывающий коэффициенты использования установленного электрооборудования и выбирающий оптимальный способ компенсации реактивной мощности в зависимости от этих коэффициентов;
- Е) Учёт технико-экономических показателей: критерий, основанный на сравнении технико-экономических показателей различных способов компенсации реактивной мощности, таких как потери электроэнергии, суммарные приведённые затраты, использование конденсаторных установок и другие.

```

25 # Минимум потерь электроэнергии в электрической сети:
26 def loss_minimization(network, qs):
27     loss = network.losses(voltage_magnitudes=network.parameters().voltage_magnitudes, qs=qs)
28     return loss
29
30 # Минимум суммарных приведенных затрат:
31 def cost_minimization(network, qs, cost_func):
32     total_cost = cost_func(network, qs)
33     return total_cost
34
35 # Максимальное использование конденсаторных установок:
36 def capacitor_utilization(network, qs):
37     qs_used = sum(q for q in network.devices(qs_type='capacitor').qs)
38     return qs_used
39
40 # Учёт графика электрической нагрузки:
41 def load_profile(network, qs, load_data):
42     load_profile = calculate_load_profile(load_data)
43     return load_profile
44
45 # Учёт коэффициентов использования оборудования:
46 def equipment_utilization(network, qs, equipment_data):
47     equipment_utilization = calculate_equipment_utilization(equipment_data)
48     return equipment_utilization
49
50 # Учёт технико-экономических показателей:
51 def techno_economic_evaluation(network, qs, techno_economic_data):
52     techno_economic_evaluation = calculate techno_economic_evaluation(techno_economic_data)
53     return techno_economic_evaluation
54
55 # Теперь можно создать функцию для определения оптимальных решений по степени компенсации реактивной мощности, используя выбранные критерии:
56 def optimal_reactive_power_compensation(network, qs, criteria, qs_type, cost_func, load_data, equipment_data, techno_economic_data):
57     losses = loss_minimization(network, qs)
58     costs = cost_minimization(network, qs, cost_func)
59     utilization = {
60         'capacitor': capacitor_utilization(network, qs),
61         'load': load_profile(network, qs, load_data),
62     }

```

Рисунок 2 – Программный код создания критериев определения оптимальных решений по степени компенсации реактивной мощности на языке программирования Python

Выбор оптимального способа компенсации реактивной мощности должен учитывать все эти критерии и учитывать специфику электрической сети, нагрузки предприятия и технико-экономические показатели.

3. Оценка практической применимости и эффективности предложенного алгоритма математической модели и методов решения многоцелевой оптимизации для распределения реактивной мощности в электрических сетях будет проведена на основе анализа результатов экспериментов. В ходе экспериментов проведено сравнение полученных решений на реальных данных.

Для проведения эксперимента был выбран участок Красноярской железной дороги (перегон Ачинск-I – Чернореченская). В настоящее время для проведения расчётов используется программный комплекс «КОРТЭС», предназначенный для решения задач в области электроэнергетики. Он позволяет моделировать и анализировать режимы работы электроэнергетических систем, проводить тяговые расчёты и т.д. «КОРТЭС» может использоваться для проектирования новых подстанций, а также для анализа и оптимизации уже существующих энергетических систем.

На рисунке 1 представлена схема питания и секционирования участка Красноярской железной дороги Ачинск-I – Чернореченская. На данном участке применяется система тягового электроснабжения 25 кВ, которая содержит 2 тяговые подстанции (ТП), 2 пункта параллельного соединения (ППС), 1 пост секционирования (ПС), пикеты которых приведены в приложении В (таблица В.1). Данный участок имеет двухстороннее питание от ЛЭП 110 кВ от РП Ачинск-I и РП Чернореченская.

На участке Ачинск-I – Чернореченская на данный момент не используются устройства поперечной и ёмкостной компенсации реактивной мощности. Это связано с тем, что данный участок является частью системы электроснабжения Красноярской железной дороги, которая использует преимущественно асинхронные двигатели в своем электроподвижном составе. Эти двигатели не требуют применения устройств компенсации реактивной мощности, так как они сами способны генерировать реактивную мощность.

Кроме того, на участке Ачинск-I - Чернореченская используются преимущественно воздушные линии электропередачи, которые не требуют установки устройств компенсации реактивной мощности из-за их высокого индуктивного сопротивления.

Однако, на других участках Красноярской железной дороги могут использоваться устройства компенсации реактивной мощности, особенно на тех участках, где есть необходимость снижения потерь электроэнергии или улучшения качества электроэнергии.

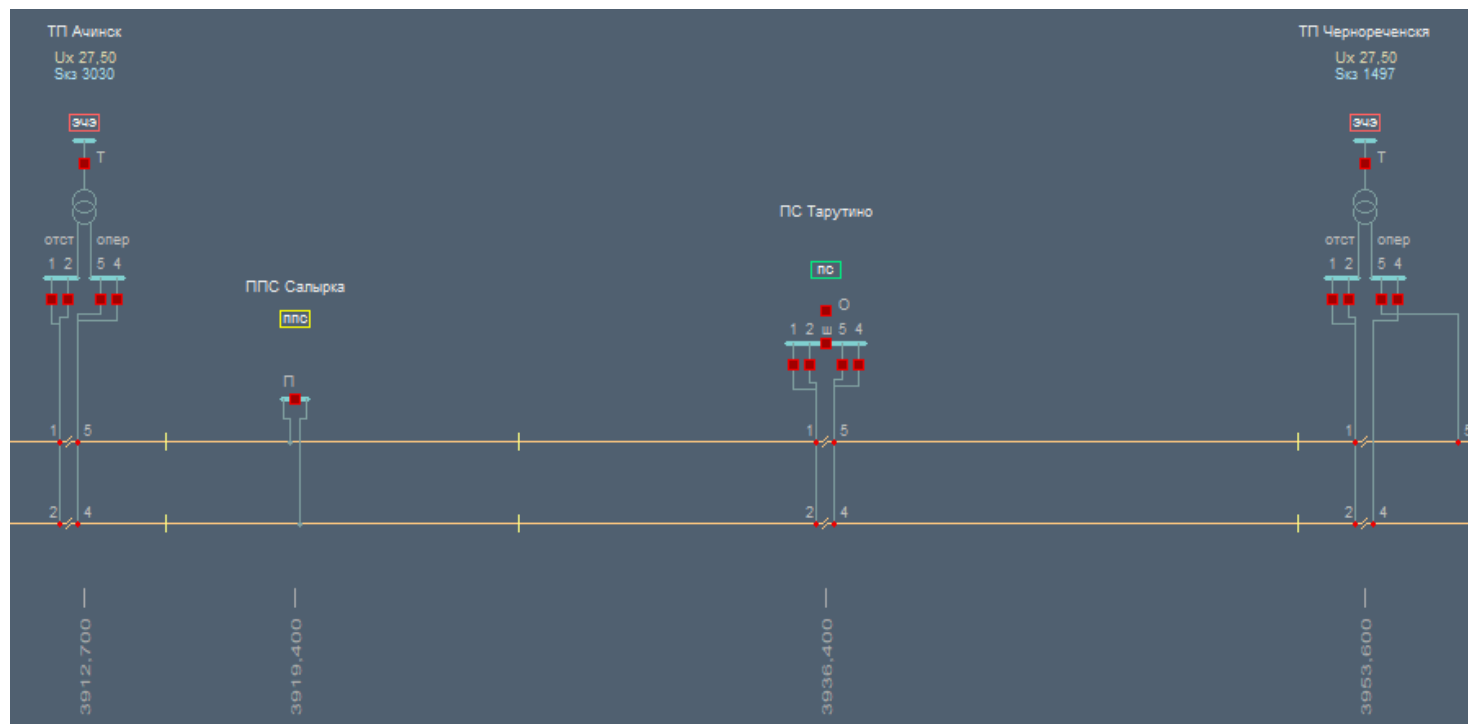


Рисунок 1 – Схема питания и секционирования участка Ачинск-I – Чернореченская

Сравнение будет проводиться с помощью программного комплекса «КОРТЭС» и созданного программного кода.

При проведении расчётов будут определены параметры устройства поперечной компенсации реактивной мощности (при расчёте в программном комплексе «КОРТЭС» и созданного программного кода. В таблице 1 проведён сравнительный анализ расчёта.

Таблица 1 – Сравнительный анализ расчёта в программном комплексе «КОРТЭС» и созданного программного кода

Расчётный параметр		КОРТЭС	Программный код
С одним трансформатором	Ток короткого замыкания ПС, А	5500	5498
	Коэффициент токораспределения k_1	0,26	0,26
	Коэффициент токораспределения k_2	0,33	0,33
С двумя трансформаторами	Ток короткого замыкания ПС	6627	6625
	Коэффициент токораспределения k_1	0,26	0,26
	Коэффициент токораспределения k_2	0,33	0,33
Расчёт мощности КУ, $Q_{ку}$, МВАр	Аналитический метод	8,3	8,2
	Метод КЗ	10,3	10,4

По таблице 1 можно сделать вывод, что при созданном программном коде, созданном для оптимизации распределения реактивной мощности в электрических сетях практически равен расчётным данным в программном комплексе «КОРТЭС».

Следовательно, созданный программный код на языке программирования Python может использоваться для оптимизации распределения реактивной мощности в электрических сетях путём разработки алгоритма управления передвижными устройствами. Программный код позволяет решить задачи, связанные с эффективным использованием электрической энергии, повышением устойчивости и надёжности энергетической системы, а также позволяет снизить затраты на электрическую энергию.

Таким образом, разработанный алгоритм и методы решения многоцелевой оптимизации для распределения реактивной мощности в электрических сетях могут быть применены на практике и эффективны для улучшения технико-экономических показателей сети.

Список литературы:

1. Качинская, Л. М. Применение программно-вычислительного комплекса для расчета режимов работы городской распределительной электрической сети / Л. М. Качинская, Д. Э. Кронгауз, В. И. Пантелеев // Промышленная энергетика. – 2010. – № 7. – С. 32-35. – EDN RDLVUR.
2. Кронгауз, Д. Э. Повышение качества электроэнергии в городских распределительных сетях посредством управления режимами реактивной мощности / Д. Э. Кронгауз // Промышленная энергетика. – 2010. – № 10. – С. 39-43. – EDN RIUWKR.
3. Кронгауз, Д. Э. Актуальная концепция компенсации реактивной мощности в распределительных сетях / Д. Э. Кронгауз // Промышленная энергетика. – 2022. – № 1. – С. 35-43. – DOI 10.34831/EP.2022.25.33.005. – EDN RPKKGH.
4. Рубцов, К. Д. Разработка нечётких алгоритмов для прогнозирования и потребления электроэнергии / К. Д. Рубцов, Д. Э. Кронгауз // Молодая наука Сибири. – 2023. – № 2(20). – С. 152-166. – EDN UOJFWI.
5. Кронгауз, Д. Э. Переключение РПН трансформаторов с помощью нечеткой логики / Д. Э. Кронгауз, К. Д. Рубцов // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2024. – № 1(82). – С. 54-58. – EDN LTORYG.