МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики
(наименование института полностью)

Кафедра Электроснабжение и электротехника
(наименование)

13.03.02. Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки / специальности)

Электроснабжение
(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Реконструкция ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС

Обучающийся А. В. Раткин
(Инициалы Фамилия) (личная подпись)

Руководитель к.т.н., Д. А. Кретов
(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2024

Аннотация

Предложен проект реконструкции электрической части распределительного устройства (далее – ОРУ-110 кВ) Таврической ТЭС, обусловленной вводом двух новых отходящих линий 110 кВ к потребителям в связи с увеличением нагрузки потребителей и расширением питающей сети региона. Для достижения основной цели работы, решены следующие основные задачи:

- приведена исходная техническая характеристика объекта реконструкции с последующей разработкой и теоретическим обоснованием мероприятий по реконструкции ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС;
- проведено техническое обоснование мероприятий по реконструкции силовой части ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, в результате чего обоснованы основные решения по выбору и проверке основного оборудования на новых линиях 110 кВ, отходящих к потребителям;
- проведено техническое обоснование мероприятий по реконструкции вторичных цепей ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, в результате чего выбраны новые решения, позволяющие повысить надёжность и селективность на объекте реконструкции;
- выполнен расчёт молниезащиты и заземления ОРУ-110 кВ ТЭС.

Работа содержит записку объёмом 79 страниц печатного текста. Для визуализации данных и принятых решений использовано 10 таблиц и 8 рисунков. Графический материал работы содержит:

- структурную схему Таврической ТЭС;
- схему ОРУ-110 кВ до и после реконструкции;
- план размещения оборудования ОРУ-110 кВ;
- схему РЗиА ОРУ-110 кВ;
- схемы заземления и молниезащиты ОРУ-10 кВ.

Содержание

Введение 4
1 Исходная техническая характеристика и разработка мероприятий по реконструкции ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС 7
1.1 Общая характеристика Таврической ТЭС 7
1.2 Анализ схемы электрических соединений и оборудования ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС 16
2 Техническое обоснование мероприятий по реконструкции силовой части ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС 23
2.1 Расчёт электрических нагрузок ОРУ-110 кВ 23
2.2 Проверка силовых трансформаторов, питающих ОРУ-110 кВ, на допустимую перегрузку 27
2.3 Выбор и проверка сечений отходящих воздушных линий ОРУ-110 кВ 29
2.4 Расчёт токов короткого замыкания на шинах ОРУ-110 кВ 33
2.5 Выбор и проверка электрических аппаратов ОРУ-110 кВ 42
3 Техническое обоснование мероприятий по реконструкции вторичных цепей ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС 52
3.1 Выбор системы контроля и учёта электроэнергии 52
3.2 Выбор системы релейной защиты и автоматики ОРУ-110 кВ 57
4 Расчёт молниезащиты и заземления ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС 63
4.1 Расчёт молниезащиты ОРУ-110 кВ 63
4.2 Расчёт контура заземления ОРУ-110 кВ 66
Заключение 72
Список используемых источников 77

Введение

Реконструкция электрической части распределительных устройств на электростанциях Российской Федерации является важным направлением для повышения надежности и эффективности энергоснабжения.

Актуальность задачи обусловлена устареванием значительной части оборудования и схем электрических соединений, введенных в эксплуатацию несколько десятилетий назад.

Постоянное увеличение нагрузки на энергетическую инфраструктуру, необходимость интеграции возобновляемых источников энергии и растущие требования к кибербезопасности делают реконструкцию схем электрических соединений и модернизацию оборудования необходимой для повышения эксплуатационной надежности и адаптации к современным условиям энергетического рынка.

Перспективы развития реконструкции распределительных устройств включают внедрение передовых технологий, таких как цифровизация схем электрических соединений и использование интеллектуальных систем управления.

Оптимизация схем позволяет улучшить их топологию, снизить потери энергии и обеспечить более гибкое управление потоками мощности. Такие технологии также способствуют снижению эксплуатационных затрат, улучшению контроля за состоянием оборудования и повышению его долговечности.

Цифровые системы открывают новые возможности для мониторинга и диагностики в реальном времени, что минимизирует риски аварий и сокращает продолжительность внеплановых простоев.

Государственная поддержка играет ключевую роль в стимулировании модернизации энергетической инфраструктуры, включая реконструкцию схем электрических соединений [7].

В рамках программ энергетической безопасности и устойчивого

развития правительство России выделяет средства на модернизацию распределительных устройств и их схем, поддерживает развитие отечественного производства оборудования и способствует внедрению инновационных технологий. Указанные меры направлены на обеспечение устойчивости национальной энергосистемы в условиях глобальных энергетических вызовов.

Таким образом показано, что реконструкция распределительных устройств является стратегически важным шагом для обеспечения долгосрочной стабильности и безопасности энергоснабжения России [18].

Основной целью работы является разработка проекта реконструкции электрической части ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, обусловленной вводом двух новых отходящих линий 110 кВ к потребителям в связи с увеличением нагрузки потребителей и расширением питающей сети региона.

Объектом исследования является электрическая часть ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС.

Предметом исследования выступают параметры и показатели надёжности, бесперебойности, безопасности и экономичности схемы электрических соединений и оборудования объекта исследования.

Для достижения основной цели работы, планируется решение следующих основных задач:

- на первом этапе планируется привести исходную техническую характеристику объекта реконструкции с последующей разработкой и теоретическим обоснованием мероприятий по реконструкции ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС;
- второй этап работы предусматривает проведение технического обоснования мероприятий по реконструкции силовой части ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, в результате чего требуется обосновать основные решения по выбору и проверке основного оборудования на новых линиях 110 кВ, отходящих к потребителям, а также проверить

на соответствие расчётным параметрам сети оборудование объекта исследования;

- третий этап предусматривает проведение технического обоснования мероприятий по реконструкции вторичных цепей ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, в результате чего планируется выбрать новые современные решения, позволяющие повысить надёжность и селективность на объекте реконструкции;
- заключительный этап предусматривает расчёт молниезащиты и заземления ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС с целью обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала и повышения надёжности работы оборудования.

Таким образом, в работе необходимо выбрать такие технические решения, которые в конечном итоге приведут к повышению параметров и показателей надёжности, бесперебойности, безопасности и экономичности схемы электрических соединений и оборудования ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС.

1 Исходная техническая характеристика и разработка мероприятий по реконструкции ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС

1.1 Общая характеристика Таврической ТЭС

Рассматриваемая в работе Таврическая ТЭС является современной тепловой электростанцией, расположенной в Крыму, недалеко от Симферополя [15].

Строительство станции было начато в рамках программы по обеспечению энергетической безопасности и независимости региона после его присоединения к Российской Федерации в 2014 году.

Таврическая ТЭС является частью комплексной программы по созданию автономной энергетической системы Крыма, включающей развитие генерирующих мощностей и модернизацию электрических сетей.

Основной задачей Таврической ТЭС является обеспечение стабильного энергоснабжения полуострова и снижение зависимости от внешних поставок электроэнергии.

Станция использует современное оборудование, что позволяет достигать высокой эффективности и экологичности. Ее мощность составляет порядка 470 МВт, что значительно увеличило энергетический потенциал региона.

С вводом станции в эксплуатацию значительно снизились риски энергодефицита, особенно в период пиковых нагрузок.

Кроме того, Таврическая ТЭС интегрирована в общую энергосистему России через энергомост, что обеспечивает надежность поставок и позволяет перераспределять мощности в зависимости от потребностей [16].

Внешний вид Таврической ТЭС показан в работе на рисунке 1.

Рисунок 1 – Внешний вид Таврической ТЭС

Площадка размещения Таврической ТЭС расположена по адресу: Российская Федерация, территория Трудовского сельского поселения Симферопольского района, восточнее с. Строгановка за границами населенных пунктов, вблизи ПС-330/220/110 кВ «Симферопольская».

Таврическая ТЭС предназначена для выработки электрической энергии для нужд жилищно-коммунального хозяйства и предприятий промышленного района.

На объекте построены и введены в эксплуатацию двух моноблоков ПГУ-235 на базе газотурбинной установки типа ТПЭ-180, паровой турбины модели К-80-7.4, двухконтурного горизонтального котла-утилизатора типа П-149. Установленная электрическая мощность каждого энергоблока составляет 235 МВт.

Режим работы энергоблоков ПГУ – базовый согласно диспетчерскому графику нагрузок.

Выдача мощности Таврической ТЭС осуществляется через вновь сооружаемые открытые распределительные устройства (ОРУ 330 кВ и ОРУ-

110 кВ) и далее в энергосистему через две воздушные линии (далее – ВЛ) напряжением 330 кВ и семь ВЛ 110 кВ.

Отпуск тепловой энергии для нужд жилищно-коммунального хозяйства от ПГУ-ТЭС не предусматривается. Отпуск пара для нужд потребителей города также не предусматривается.

Электроснабжение потребителей собственных нужд, общестанционной и блочной частей ТЭС осуществляется на следующих напряжениях:

- 6 кВ переменного тока для электродвигателей мощностью 160 кВт и выше;
- 0,38/0,22 кВ переменного тока для электродвигателей мощностью до 160 кВт, а также для сетей освещения и сварки;
- 220 В постоянного тока для электроприводов постоянного тока, а также для цепей управления, защиты, автоматики и аварийного освещения.

В качестве основного топлива на данном энергетическом объекте используется природный газ, аварийного – дизельное топливо.

Топливо – природный газ (основное), суммарный годовой расход природного газа на ПГУ-ТЭС составит 806,4 млн. м^3, дизельное топливо (аварийное) - два наземных металлических резервуара емкостью по 5000 м^{3}каждый. Сырье, поступающее на электростанцию для обеспечения эксплуатации энергоблока ПГУ-235, – природный газ (основное топливо), дизельное топливо (аварийное) полностью используется в основном производственном цикле. Техническая вода, забираемая из реки Малый Салгир и пруда №60, также полностью используется в технологическом цикле.

Очищенные стоки после очистных сооружений дождевых и замасленных сточных вод после обеззараживания перекачиваются на повторное использование в технологическом цикле электростанции.

При эксплуатации энергоблоков ПГУ-235 образуются отходы 1,3,4 и 5 классов опасности.

Симферопольская ПГУ-ТЭС выполняется в объеме двух энергоблоков единичной мощностью 235 МВт каждый. Энергоблок состоит из одной газотурбинной (ГТУ) и одной паротурбинной (ПТУ). Номинальная мощность генератора ГТУ составляет 173,4 МВт, мощность генератора ПТУ – 80 МВт.

Выдача мощности Таврической ТЭС 2×235 МВт осуществляется через открытые распределительные устройства 330 кВ и ОРУ-110 кВ (ОРУ 330 кВ и ОРУ-110 кВ) и далее в энергосистему через две ВЛ 330 кВ: «Таврическая ТЭС – Симферопольская», Таврическая ТЭС – Джанкой», и семь ВЛ 110 кВ: «Таврическая ТЭС – Симферопольская №1», «Таврическая ТЭС – Симферопольская №2», «Таврическая ТЭС – Симферопольская №3», «Таврическая ТЭС – Симферопольская №4», «Таврическая ТЭС – Марьино», «Таврическая ТЭС – Восточная», «Таврическая ТЭС – Кубанская».

РУ 330 кВ Таврической ТЭС выполнено по схеме №330-17 «Полуторная схема» в объеме, обеспечивающем присоединение ЛЭП 330 кВ «Таврическая ТЭС – Симферопольская», ЛЭП 330 кВ «Таврическая ТЭС – Джанкой», энергоблока №1 (ГТУ и ПТУ) и автотрансформатора напряжением 330/110 кВ мощностью 200 МВА с выключателями с пофазным приводом, со следующим распределением присоединений по «полям» РУ 330 кВ:

- ПТУ энергоблока №1 в «поле» с ЛЭП 330 кВ «Симферопольская ПГУ-ТЭС (Таврическая ТЭС) – Симферопольская»;
- ГТУ энергоблока №1 в «поле» с ЛЭП 330 кВ «Симферопольская ПГУ-ТЭС (Таврическая ТЭС) – Джанкой»;
- АТ-1 в отдельном «поле» с присоединением к РУ 330 кВ через два выключателя.

Заходы ВЛ 330 кВ «Джанкой – Симферопольская» на РУ 330 кВ Таврической ТЭС протяженностью 1,1 км выполнено сечением провода не менее 2×300 мм^2, в одноцепном исполнении с образованием ЛЭП 330 кВ «Таврическая ТЭС - Джанкой» и ЛЭП 330 кВ «Таврическая ТЭС – Симферопольская».

На ОРУ 330 кВ применяются колонковые высоковольтные выключатели с элегазовой изоляцией и разъединители горизонтально-поворотного типа. Все оборудование ОРУ 330 кВ рассчитано на ток КЗ, не превышающий 40 кА.

ОРУ-110 кВ выполняется по схеме «две рабочие и обходная система шин» (№110-13Н).

На ОРУ-110 кВ применяются колонковые высоковольтные выключатели с элегазовой изоляцией и разъединители горизонтально-поворотного типа. Все оборудование ОРУ-110 кВ рассчитано на ток КЗ, не превышающий 40 кА.

В состав основного электротехнического оборудования энергоблока ПГУ-235 входят силовые блочные трансформаторы мощностью 250 МВА и 125 МВА и рабочий трансформатор собственных нужд 25 МВА.

Силовой трехфазный двухобмоточный блочный трансформатор ТДЦ-250000/330 (мощность 250 МВА, номинальное напряжение 347/15,75 кВ) служит для связи ОРУ 330 кВ и генератора газовой турбины (мощность 173,4 МВт, номинальное напряжение 15,75 кВ, cosφ=0,85). Нейтраль обмотки высшего напряжения трансформаторов заземлена.

Силовой трехфазный двухобмоточный блочный трансформатор ТДЦ-125000/330 (мощность 125 МВА, номинальное напряжение 347/6,3 кВ) служит для связи ОРУ 330 кВ и генератора паровой турбины (мощность 80 МВт, cosφ=0,8). Нейтраль обмотки высшего напряжения трансформаторов заземлена.

Силовой трехфазный двухобмоточный блочный трансформатор ТДЦ-250000/110 (мощность 250 МВА, номинальное напряжение 121/6,3 кВ) служит для связи ОРУ-110 кВ и генератора газовой турбины (мощность 173,4 МВт, cosφ=0,85).

Нейтраль обмотки высшего напряжения трансформаторов заземлена с помощью разъединителя.

Ещё один силовой трехфазный двухобмоточный блочный трансформатор ТДЦ-125000/110 (мощность 125 МВА, номинальное

напряжение 121/6,3 кВ) служит для связи ОРУ-110 кВ и генератора паровой турбины (мощность 80 МВт, напряжение 10,5 кВ, cosφ=0,8). Нейтраль обмотки высшего напряжения трансформаторов заземлена с помощью разъединителя.

Электрическая связь между блочными трансформаторами, резервным трансформатором и ОРУ-110 кВ, 330 кВ выполнена гибкой ошиновкой.

Для связи ОРУ 330 кВ и 110 кВ предусмотрен трехфазный автотрансформатор АТДЦТН-200000/330/110 (мощность 200 МВА, номинальное напряжение 330/115/6,3 кВ).

Электрическая связь между блочными трансформаторами и генераторами ГТУ и ПТУ 2-х энергоблоков осуществлена с помощью пофазно-экранированных токопроводов ($U_{ном}$=20 кВ, $I_{ном}$=8000 А для ГТУ, $I_{ном}$=6300 А для ПТУ).

В цепи каждого генератора установлен генераторный выключатель по типу НВЗ ($U_{ном}$=15,75 кВ, $I_{ном}$=8000 А для ГТУ и $U_{ном}$=10,5 кВ, $I_{ном}$=6300 А для ПТУ).

В генераторном выключателе предусмотрен пусковой разъединитель для подключения тиристорного пускового устройства (ТПУ) к выводам генератора на время пуска ГТУ.

В цепи каждого блочного трансформатора ГТУ между генераторным выключателем и блочным трансформатором предусматривается отпайка от генераторного токопровода ($U_{ном}$=20 кВ, $I_{ном}$=1600 А) к рабочему трансформатору собственных нужд мощностью *25* МВА, напряжением 15,75±8х1,5%/6,3-6,3 кВ.

Наличие генераторного выключателя даёт возможность осуществить запуск энергоблока от рабочего трансформатора собственных нужд. Рабочий трансформатор собственных нужд в нормальном режиме снабжает электроэнергией собственные нужды одного энергоблока.

Газовая турбина совместно с генератором, системой возбуждения, тиристорным пусковым устройством, распределительным устройством

переменного и постоянного тока для питания собственных нужд ГТУ поставляется комплектно ООО «ВО «ТЕХНОПРОМЭКСПОРТ».

Вспомогательное оборудование ГТУ устанавливается в контейнерах рядом в турбинном отделении главного корпуса.

Паровая турбина совместно с генератором, системой возбуждения поставляется комплектно ПАО «Силовые машины».

Для резервирования секций собственных нужд каждого энергоблока, предусмотрен резервный трансформатор собственных нужд мощностью 25 МВА, напряжением 115±9х1,78%/6,3-6,3 кВ, подключенный к ОРУ-110 кВ.

К обмоткам НН резервного трансформатора собственных нужд через резервные секции КРУ 6 кВ присоединяются магистрали резервного питания 6 кВ. Резервный трансформатор собственных нужд может применяться для запуска одного энергоблока. Нейтраль обмотки высшего напряжения резервного трансформатора собственных нужд заземлена с помощью разъединителя.

Каждый энергоблок имеет собственное распределительное устройство 6 кВ для питания собственных нужд блока. Распределительное устройство 6 кВ выполняется двухсекционным. На каждой из секций имеется ввод рабочего и резервного питания (от рабочего и резервного трансформаторов собственных нужд).

От секций КРУ 6 кВ запитываются двигатели собственных нужд станции мощностью 160 кВт и более, а также трансформаторы собственных нужд 6/0,4 кВ. Двигатели меньшей мощности запитываются с секций собственных нужд 0,4 кВ, питающихся от соответствующих трансформаторов СН 6/0,4 кВ. В ячейках КРУ 6 кВ установлены вакуумные выключатели с отключающей способностью 31,5 кА и 20 кА.

Основными потребителями собственных нужд на напряжении 6 кВ являются:

– двигатель насоса жидкого топлива ГТУ: $U_{ном}$=6,0 кВ, P=290 кВт – 1 шт. (1 рабочий);

– двигатель насоса питательной воды высокого давления: $U_{ном}$=6,0 кВ, P=1250 кВт – 2 шт. (1 рабочий, 1 резервный на один энергоблок);
– двигатель циркуляционного насоса: $U_{ном}$=6,0 кВ, P=1250 кВт – 2 шт. (2 рабочих);
– двигатель насоса системы регулирования: $U_{ном}$=6,0 кВ, P=200 кВт – 2 шт. (2 на один энергоблок);
– трансформатор возбуждения ГТУ: $U_{ном}$=6,3 кВ, S=950 кВА;
– трансформатор ТПУ ГТУ: $U_{ном}$=6,3 кВ, S=1760 кВА;
– трансформатор возбуждения ПТУ: $U_{ном}$=6,3 кВ, S=802 кВА;
– трансформаторы собственных нужд 6/0,4 кВ главного корпуса и вспомогательных зданий и сооружений.

Также от КРУ 6 кВ запитана насосная добавочной воды, проектируемая по отдельному техническому заданию на внеплощадочные сети. В соответствии с техническим заданием, для электроснабжения указанной насосной предусматриваются две ячейки КРУ 6 кВ.

Суммарная расчетная нагрузка рабочего трансформатора собственных нужд 15,75/6,3-6,3 в нормальном режиме составляет 24,176 МВА. В соответствии с данной нагрузкой собственных нужд, мощность трансформатора принята равной 25 МВА.

На секциях 6 кВ одного энергоблока суммарная установленная трансформаторная мощность равна 25,96 МВА, двигательная расчетная нагрузка равна 4,43 МВт. Суммарная расчетная мощность потребителей 0,4 кВ составляет 14760,83 кВт.

Нормальная схема электрических соединений Таврической ТЭС по состоянию на 2024 год представлена на рисунке 2.

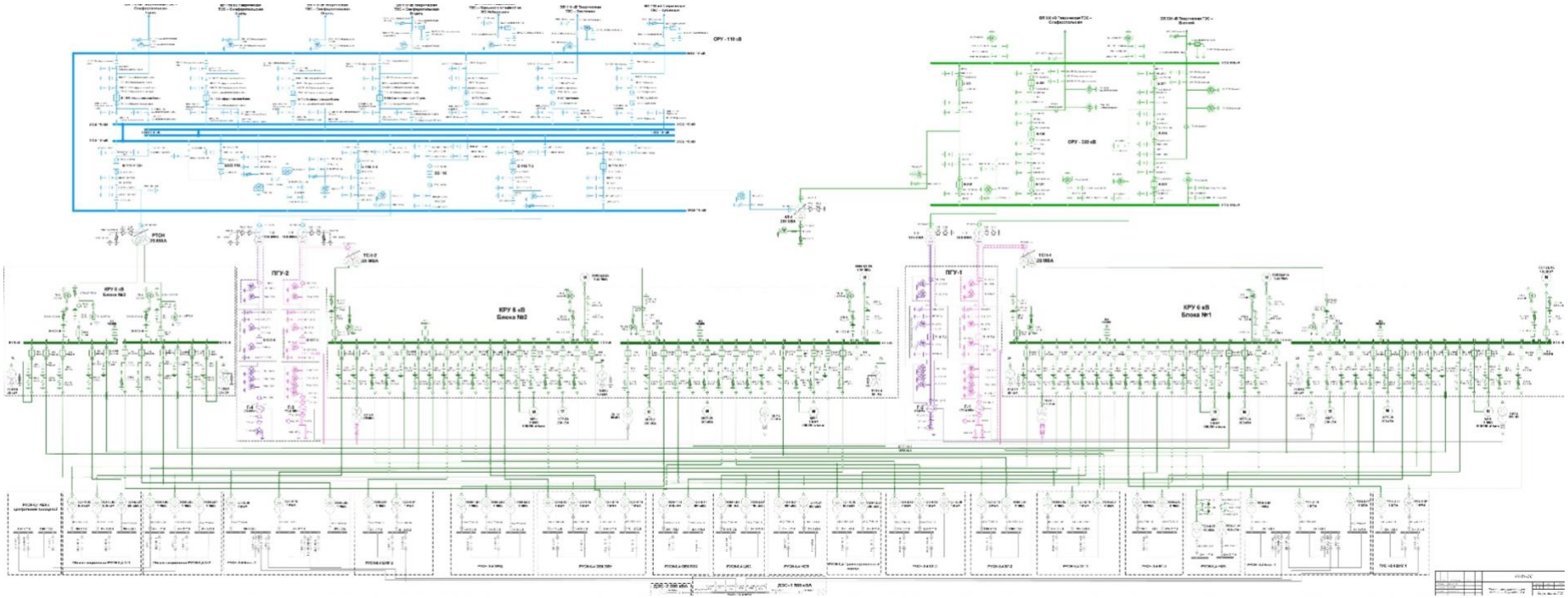

Рисунок 2 – Нормальная схема электрических соединений Таврической ТЭС по состоянию на 2024 год

Структурная схема Таврической ТЭС показана на графическом листе 1.

На основе приведённых данных, далее в работе проводится более детальное описание и анализ исходной схемы электрических соединений и оборудования ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС.

1.2 Анализ схемы электрических соединений и оборудования ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС

Проводится анализ схемы электрических соединений и оборудования ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС.

ОРУ-110 кВ получает питание от двух силовых трансформаторов ПГУ-2 Таврической ТЭС. Мощность первого трансформатора составляет 125 МВА (ТДЦ-125000/110), мощность второго – 250 МВА (ТДЦ-250000/110). Таким образом, максимальная мощность, которую можно передать через ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, составляет 375 МВА.

ОРУ-110 кВ конструктивно сооружено открытым (далее - ОРУ-110 кВ). Оно выполнено по схеме «две рабочие и обходная система шин» (№110-13Н).

Такая схема обладает рядом особенностей, которые обеспечивают высокую степень надежности и гибкости в эксплуатации. В основе данной схемы лежит использование двух независимых систем рабочих шин и обходной шины, что позволяет осуществлять как параллельную работу, так и переключение между ними без прерывания электроснабжения [3].

Основное преимущество такой схемы заключается в возможности проведения ремонтных и профилактических работ на любом из участков оборудования или шин без отключения нагрузки. Данный факт достигается за счет использования обходной шины, на которую может быть временно переведена нагрузка при необходимости отключения одной из рабочих шин.

Кроме того, схема №110-13Н, применяемая в ОРУ-110 кВ, обеспечивает высокую степень оперативной гибкости при возникновении аварийных ситуаций. В случае выхода из строя одного из элементов, нагрузка может быть

перераспределена на другую систему шин, что минимизирует время простоя и вероятность отключения потребителей [13].

Конструкция схемы способствует повышению надежности энергоснабжения за счет возможности независимого управления каждым элементом системы, что позволяет поддерживать стабильность работы станции даже при существенных изменениях нагрузки или внешних воздействиях. Сочетание двух рабочих и обходной шин также оптимизирует процессы переключений, снижая вероятность аварийных ситуаций, связанных с ошибками в управлении или техническими неисправностями.

Таким образом, схема электрических соединений «две рабочие и обходная система шин» на ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС представляет собой оптимальное решение, сочетающее в себе высокую степень надежности, гибкость эксплуатации и возможность выполнения ремонтных и профилактических работ без отключения потребителей [14].

Следовательно, в замене данный тип схемы на объекте не нуждается.

На ОРУ-110 кВ применяются колонковые высоковольтные выключатели с элегазовой изоляцией и разъединители горизонтально-поворотного типа. Все оборудование ОРУ-110 кВ рассчитано на ток КЗ, не превышающий 40 кА. Ошиновка ОРУ-110 кВ выполняется жесткой, с организацией проездов для обслуживания высоковольтного оборудования (выключателей, разъединителей и прочего оборудования). Жесткая ошиновка заводского изготовления поставлена комплектно с опорными металлоконструкциями, в том числе и для электротехнического оборудования.

Ошиновка сборных шин и связей внутри ячеек, выполнена из трубчатых алюминиевых шин, которые закреплены своими концами на опорных изоляторах или на контактных выводах высоковольтного оборудования. Внутри ошиновки имеется гаситель, предназначенный для гашения вибрации, которая может возникнуть при воздействии ветровых нагрузок. Электрическое соединение между собой соседних пролетов каждой фазы осуществляется при помощи токовых компенсаторов, что соответствует [9].

Также, для выполнения спусков, ответвлений или для присоединения к оборудованию, выполняются гибкие связи проводом марки АС, с соответствующей опрессовкой зажимов. Сейсмическая стойкость ошиновки не более 8 баллов по шкале MSK-64. Связь между пристанционным узлом и ОРУ-110 кВ выполняется гибкой ошиновкой – проводом марки АС-300 три провода на фазу.

Перечень основного оборудования, установленного в ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень основного оборудования, установленного в ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС

Наименование оборудования	Марка оборудования	Завод-изготовитель	Единица измерения	Количество, единиц
Выключатель элегазовый колонковый однополюсный на напряжение 110 кВ, номинальный ток 2000 А, ток отключения 40 кА	ВГТ-110.III-ОП-40/2000 У1	ЗАО «ЗЭТО» г. Великие Луки, пр. Октябрьский, 79	комплект (3 фазы)	13
Разъединитель двухколонковый горизонтально-поворотный на напряжение 110 кВ, номинальный ток 2000 А, с двумя комплектами заземляющих ножей	РГН.2-110.II/2000-50 УХЛ1	ЗАО «ЗЭТО» г. Великие Луки, пр. Октябрьский, 79	комплект (3 фазы)	16
Разъединитель двухколонковый горизонтально-поворотный ступенчато-килевой установки на напряжение 110 кВ, номинальный ток 2000 А, с двумя комплектами заземляющих ножей	РГН.2-СК-110.II/2000-50 УХЛ1	ЗАО «ЗЭТО» г. Великие Луки, пр. Октябрьский, 79	комплект (3 фазы)	1
Разъединитель двухколонковый горизонтально-поворотный на напряжение 110 кВ, номинальный ток 2000 А, с одним комплектом заземляющих ножей (РГ1а- 12 комплектов, РГ1б- 12 комплектов)	РГН.1-110.II/2000-50 УХЛ1	ЗАО «ЗЭТО» г. Великие Луки, пр. Октябрьский, 79	комплект (3 фазы)	24

Продолжение таблицы 1

Наименование оборудования	Марка оборудования	Завод-изготовитель	Единица измерения	Количество, единиц
Разъединитель двухколонковый горизонтально-поворотный ступенчато-килевой установки на напряжение 110 кВ, номинальный ток 2000 А, с одним комплектом заземляющих ножей (РГ1а- 4 комплекта, РГ1б- 7 комплектов)	РГН.1-СК-110.II/2000-50 УХЛ1	ЗАО «ЗЭТО» г. Великие Луки, пр. Октябрьский, 79	комплект (3 фазы)	11
Ограничитель перенапряжений нелинейный однофазный с регистратором срабатывания, изолирующей подставкой, на напряжение 110 кВ, с опорной конструкцией, в составе блока РОТн и/или ОТн	ОПН-П1-110/77/10/3 III УХЛ1	ЗАО «ЗЭТО» г. Великие Луки, пр. Октябрьский, 79	шт. (1 фаза)	30
Трансформатор напряжения измерительный однофазный четырехобмоточный на напряжение 110 кВ, с опорной конструкцией	ЗНОГ-110.III УХЛ1	ЗАО «ЗЭТО» г. Великие Луки, пр. Октябрьский, 79	шт. (1 фаза)	6
Трансформатор напряжения измерительный однофазный трехобмоточный на напряжение 110 кВ, с опорной конструкцией	ЗНОГ-110.III У1	ЗАО «ЗЭТО» г. Великие Луки, пр. Октябрьский, 79	шт. (1 фаза)	24
Трансформатор тока измерительный однофазный четырехобмоточный на напряжение 110 кВ, с опорной конструкцией, в составе блока ТтВТт	ТОГФ-110-II-0,2S/5P-1600-800-400/1	ЗАО «ЗЭТО» г. Великие Луки, пр. Октябрьский, 79	шт. (1 фаза)	78
Комплект жесткой ошиновки ОРУ-110 кВ, номинальное напряжение 110 кВ, номинальный ток 3150 А, трехсекундный ток термической стойкости 40 кА, ток динамической стойкости 125 кА	-	ЗАО «ЗЭТО» г. Великие Луки, пр. Октябрьский, 79	комплект	1

Потребителями открытого распределительного устройства (ОРУ) 110 кВ Таврической ТЭС являются как крупные промышленные предприятия, так и объекты социальной инфраструктуры региона.

Среди основных потребителей можно выделить энергоснабжающие компании, обеспечивающие электроэнергией город Симферополь и прилегающие районы, крупные промышленные комплексы, включая предприятия машиностроения и химической промышленности.

Важными потребителями являются также объекты водоснабжения и канализационной инфраструктуры, которые требуют стабильного энергоснабжения для бесперебойной работы.

Кроме того, станция через ОРУ-110 кВ обеспечивает электроэнергией транспортные узлы, включая железнодорожные станции и аэропорт, что критично для транспортной инфраструктуры полуострова.

Потребители ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС получают питание по семи линиям электропередачи напряжением 110 кВ.

Кроме того, в рамках расширения производственных мощностей региона, а также увеличением нагрузки потребителей и необходимостью дополнительных связей с энергосистемой, в 2025 году планируется сооружение и ввод в эксплуатацию двух новых линий 110 кВ.

Данный факт обуславливает реконструкцию схемы электрических соединений ОРУ-110 кВ, так как требует двух новых присоединений в рамках данных изменений схемы.

Таким образом установлено, что актуальность данной работы обусловлена практической реконструкцией схемы электрических соединений ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, что обусловлено сооружением и вводом в эксплуатацию двух новых воздушных линий 110 кВ вследствие увеличения нагрузки потребителей и необходимостью дополнительных связей с энергосистемой. Технические данные максимальных активных нагрузок потребителей ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, с учётом двух новых линий 110 кВ перспективной нагрузки, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические данные максимальных активных нагрузок потребителей ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС (с учётом двух новых линий 110 кВ перспективной нагрузки)

Наименование присоединения	$P_м$, МВА	Вид нагрузки
«Таврическая ТЭС – Симферопольская №1»	30	Существующая
«Таврическая ТЭС – Симферопольская №2»	30	Существующая
«Таврическая ТЭС – Симферопольская №3»	30	Существующая
«Таврическая ТЭС – Симферопольская №4»	30	Существующая
«Таврическая ТЭС – Марьино»	25	Существующая
«Таврическая ТЭС – Восточная»	20	Существующая
«Таврическая ТЭС – Кубанская»	30	Существующая
Всего существующей нагрузки	195	-
«Таврическая ТЭС – Денисовка»	25	Перспективная
«Таврическая ТЭС – Строгоновка»	25	Перспективная
Всего перспективной нагрузки	50	-
Всего нагрузки ОРУ-110 кВ (с учётом перспективной нагрузки)	245	-

Технические данные максимальных активных нагрузок потребителей ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС (с учётом двух новых линий 110 кВ перспективной нагрузки) принимаются за основу для проведения дальнейших расчётов.

Выводы по разделу 1.

Приведена исходная техническая характеристика Таврической ТЭС с последующей разработкой и теоретическим обоснованием мероприятий по реконструкции ОРУ-110 кВ данной электростанции.

Установлено, схема электрических соединений «две рабочие и обходная система шин» на ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС представляет собой оптимальное решение, сочетающее в себе высокую степень надежности, гибкость эксплуатации и возможность выполнения ремонтных и профилактических работ без отключения потребителей. Следовательно, в замене данный тип схемы на объекте не нуждается.

Также определено, что в ОРУ-110 кВ установлено новое современное оборудование, которое не нуждается в модернизации.

Показано, что потребители ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС получают питание по семи линиям электропередачи напряжением 110 кВ.

Кроме того, в рамках расширения производственных мощностей региона, а также увеличением нагрузки потребителей и необходимостью дополнительных связей с энергосистемой, в 2025 году планируется сооружение и ввод в эксплуатацию двух новых линий 110 кВ.

Данный факт обуславливает реконструкцию схемы электрических соединений ОРУ-110 кВ, так как требует двух новых присоединений в рамках данных изменений схемы.

Таким образом установлено, что актуальность данной работы обусловлена практической реконструкцией схемы электрических соединений ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, что обусловлено сооружением и вводом в эксплуатацию двух новых воздушных линий 110 кВ вследствие увеличения нагрузки потребителей и необходимостью дополнительных связей с энергосистемой.

Для решения поставленной задачи, приведены технические данные максимальных активных нагрузок потребителей ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, с учётом двух новых линий 110 кВ перспективной нагрузки, которые принимаются за основу для проведения дальнейших расчётов.

2 Техническое обоснование мероприятий по реконструкции силовой части ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС

2.1 Расчёт электрических нагрузок ОРУ-110 кВ

Расчёт электрических нагрузок распределительного устройства 110 кВ Таврической ТЭС представляет собой сложный процесс, включающий анализ текущего и прогнозируемого электропотребления региона, а также определение характеристик нагрузки на различные периоды работы станции.

Основной целью расчёта является определение максимальных и минимальных нагрузок, распределение мощности между потребителями и оптимизация режима работы оборудования.

Процесс расчёта базируется на данных о подключённых потребителях, их мощности и характере потребления.

Для этого используются технические данные максимальных активных нагрузок потребителей ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, с учётом двух новых линий 110 кВ перспективной нагрузки, которые принимаются за основу для проведения дальнейших расчётов.

Кроме того, необходимо учесть прогнозы роста энергопотребления, сезонные и суточные графики нагрузок, а также возможные аварийные режимы.

Расчёт также включает оценку нагрузочной способности линий электропередачи и распределительных устройств, что позволяет определить необходимую мощность генерации для покрытия всех потребностей региона на Таврической ТЭС.

Кроме того, оптимизация распределения нагрузок между системами шин ОРУ-110 кВ обеспечивает стабильную работу станции и предотвращает перегрузки отдельных элементов системы.

«Активная нагрузка потребителей ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, МВт» [5]:

$$P_{р.} = P_{м} \cdot K_{с}, \quad (1)$$

где «$P_н$ – максимальная активная нагрузка потребителей, МВт;

$K_с$ – значение коэффициента спроса» [5].

«Реактивная нагрузка потребителей ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, Мвар» [5]:

$$Q_{р.} = P_{р.} \cdot tg\varphi, квар, \quad (2)$$

где $tg\varphi$ - коэффициент реактивной мощности нагрузки,

соответствующий значению коэффициента активной мощности, о.е.

«Полная силовая нагрузка потребителей ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, МВА» [5]:

$$S_{р.} = \sqrt{P_{р.}^2 + Q_{р.}^2}. \quad (3)$$

При этом расчётный ток нормального нагрузки потребителей ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, А:

$$I_{р.} = \frac{S_{р.}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном.}}, \quad (4)$$

где $S_{р.н}$ – «полная нагрузка потребителей ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, МВА» [5];

$U_{ном.}$ – «номинальное напряжение присоединения, кВ» [5].

«Расчёт электрических силовых нагрузок проводится на примере линии 110 кВ «Таврическая ТЭС – Симферопольская №1» ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС по условиям (1) – (4)» [5]:

$$P_{р.} = 0,8 \cdot 30 = 24\ МВт,$$

$$Q_{р.} = 0,75 \cdot 24 = 18\ Мвар,$$

$$S_{р.} = \sqrt{24^2 + 18^2} = 30\ МВА,$$

$$I_{р.} = \frac{30}{\sqrt{3} \cdot 110} \cdot 10^3 = 157,5\ А.$$

Результаты расчёта электрических нагрузок остальных потребителей отходящих линий ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС представлены в сводной таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчёта электрических нагрузок потребителей отходящих линий ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС

Наименовании линии к потребителю	$P_м$, МВт	$P_р$, МВт	$Q_р$, Мвар	$S_р$, МВА	$I_р$, А
«Таврическая ТЭС – Симферопольская №1»	30,0	24,0	18,0	30,0	157,5
«Таврическая ТЭС – Симферопольская №2»	30,0	24,0	18,0	30,0	157,5
«Таврическая ТЭС – Симферопольская №3»	30,0	24,0	18,0	30,0	157,5
«Таврическая ТЭС – Симферопольская №4»	30,0	24,0	18,0	30,0	157,5
«Таврическая ТЭС – Марьино»	25,0	20,0	15,0	25,0	131,2
«Таврическая ТЭС – Восточная»	20,0	16,0	12,0	20,0	105,0
«Таврическая ТЭС – Кубанская»	30,0	24,0	18,0	30,0	157,5
«Таврическая ТЭС – Денисовка»	25,0	20,0	12,0	20,0	105,0
«Таврическая ТЭС – Строгоновка»	25,0	20,0	12,0	20,0	105,0
Всего по ОРУ-110 кВ	245,0	196,0	141,0	241,4	1267,0

Суммарная расчётная активная, реактивная и полная нагрузки, а также расчётный ток всего ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, определяются с учётом максимума одновременности нагрузок [5]:

$$P_{р.сум} = K_{ом} \sum_{i=1}^{n} P_{р.}, МВт, \qquad (5)$$

$$Q_{р.сум} = K_{ом} \sum_{i=1}^{n} Q_{р.}, Мвар, \quad (6)$$

$$S_{р.сум.} = \sqrt{P^2_{р.сум.} + Q^2_{р.сум.}}, МВА, \quad (7)$$

$$I_{р.сум.} = \frac{S_{р.сум.}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном.}}, A, \quad (8)$$

где $K_{ом}$ – «коэффициент одновременности максимумов нагрузки потребителей, о.е.» [5].

С учётом рассчитанных ранее нагрузок линий потребителей 110 кВ, по условиям (5) – (8), суммарные расчётные нагрузки ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС будут равны:

$$P_{р.сум} = 0,8 \cdot 196 = 156,8 МВт.$$

$$Q_{р.сум} = 0,8 \cdot 141 = 112,8 Мвар,$$

$$S_{р.сум.} = \sqrt{156,8^2 + 112,8^2} = 193,2 МВА,$$

$$I_{р.сум.} = \frac{193,2}{\sqrt{3} \cdot 110} = 1014,0\ A.$$

В результате расчёта электрических нагрузок, определены значения нагрузок отдельных потребителей отходящих линий ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС.

Расчётным путём установлено, что суммарные расчётные нагрузки ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, определённые с учётом одновременности максимума нагрузки, будут равны:

- суммарная активная нагрузка – 156,8 МВт;
- суммарная реактивная нагрузка – 112,8 Мвар;
- суммарная полная нагрузка – 193,2 МВА;
- суммарный расчётный ток нормального режима – 1014 А.

2.2 Проверка силовых трансформаторов, питающих ОРУ-110 кВ, на допустимую перегрузку

Далее в работе, с учётом подключения и ввода в эксплуатацию перспективной нагрузки потребителей ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, необходимо провести проверку силовых трансформаторов, питающих ОРУ-110 кВ, на их допустимую перегрузку. Используется методика [2].

Ранее было установлено, что ОРУ-110 кВ получает питание от двух силовых трансформаторов ПГУ-2 Таврической ТЭС. Мощность первого трансформатора составляет 125 МВА (ТДЦ-125000/110), мощность второго – 250 МВА (ТДЦ-250000/110). Таким образом, максимальная мощность, которую можно передать через ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, составляет 375 МВА.

Известно, что в условиях перегрузки трансформаторы подвергаются риску перегрева, что может привести к серьёзным повреждениям или их полному выходу из строя. Данный факт не только угрожает надёжности энергоснабжения, но и создает потенциальную опасность для обслуживающего персонала. Превышение допустимых нагрузок вызывает перегрев, который способен привести к аварийным ситуациям, включая пожары и повреждения инфраструктуры. Исходя из этих рисков, расчёт мощности трансформаторов должен основываться на глубоком анализе всех возможных сценариев нагрузок для обеспечения стабильной и безопасной работы подстанции. Важную роль в этом процессе играет оценка перегрузочной способности трансформаторов, с акцентом на эффективность их системы охлаждения. Анализ системы охлаждения трансформаторов позволяет не только подтвердить их соответствие расчётным нагрузкам, но и обеспечить безопасную эксплуатацию в долгосрочной перспективе. Такой подход способствует защите оборудования подстанции и безопасности персонала, минимизируя риск аварий и гарантируя стабильное электроснабжение.

Так как мощность силовых трансформаторов, которые питают ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, разные, их проверка, соответственно, на допустимую загрузку в нормальном режиме и допустимую перегрузку в аварийном режиме проводится отдельно по следующим известным выражениям:

$$K_{з.н} = \frac{0,5 \cdot S_{р.сум}}{S_{ном.т}} \leq 0,8. \quad (9)$$

$$K_{з.п} = \frac{S_{р.сум}}{S_{ном.т}} \leq 1,6. \quad (10)$$

Для трансформатора 125 МВА (ТДЦ-125000/110):

$$K_{з.н} = \frac{0,5 \cdot 193,2}{125} = 0,77 \leq 0,8.$$

$$K_{з.п} = \frac{193,2}{125} = 1,54 \leq 1,6.$$

Для трансформатора 250 МВА (ТДЦ-250000/110):

$$K_{з.н} = \frac{0,5 \cdot 193,2}{250} = 0,38 \leq 0,8.$$

$$K_{з.п} = \frac{193,2}{250} = 0,77 \leq 1,6.$$

Таким образом расчётным путём установлено, что силовые трансформаторы марки ТДЦ-125000/110 и ТДЦ-250000/110, питающие ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к их системе охлаждения по нагрузочной способности, что подтверждает их пригодность для питания ОРУ-110 кВ с учётом подключения и ввода в эксплуатацию двух линий для питания перспективной нагрузки потребителей 110 кВ на объекте исследования.

2.3 Выбор и проверка сечений отходящих воздушных линий ОРУ-110 кВ

Проводится выбор и проверка сечений отходящих воздушных линий ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС.

Целью данного расчёта является выбор сечения линий электропередачи двух новых воздушных линий для питания перспективной нагрузки, а также проверка сечений семи существующих линий 110 кВ.

Выбор и проверка сечений отходящих воздушных линий 110 кВ, получающих питание от распределительного устройства 110 кВ Таврической ТЭС, представляет собой важный этап реконструкции объекта исследования. От правильного выбора сечения проводов напрямую зависят надёжность, эффективность и безопасность системы электроснабжения. При расчёте сечений учитываются такие факторы, как величина передаваемой мощности, длина линии, допустимые потери напряжения, а также условия окружающей среды, которые могут влиять на нагрев и механическую прочность проводов.

Для обеспечения стабильной работы линии выбор сечения проводов должен основываться на расчётах электрических нагрузок. Важно, чтобы сечение было достаточным для пропускания необходимого тока без перегрева, что исключает риск повреждения оборудования и снижает потери электроэнергии.

В условиях высоких нагрузок или неблагоприятных климатических условий, правильный выбор сечения проводов особенно важен для предотвращения перегрузки и поддержания устойчивости всей энергетической системы.

Проверка выбранного сечения осуществляется путём моделирования различных режимов работы линии, включая аварийные. В ходе этих расчётов анализируются возможные перегрузки, влияние климатических факторов, таких как температура окружающей среды и ветровая нагрузка.

Таким образом, эффективный выбор и проверка сечений воздушных линий ОРУ-110 кВ обеспечивают не только надёжную работу ТЭС, но и гарантируют безопасное и бесперебойное электроснабжение потребителей.

«Выбор рационального сечения проводников выше 1 кВ проводится по экономической плотности тока» [10]:

$$F_э = \frac{I_{р.}}{j_э}, \tag{11}$$

где «$j_э$ – экономическая плотность тока, А/мм^2 (для неизолированных проводников воздушных линий принимается значение $j_э$=1,1 А/мм^2» [10].

«Проверка выбранного сечения проводника в нормальном режиме» [10]:

$$I_{доп} \geq I_{р.}, \tag{12}$$

где «$I_{доп}$ – допустимое справочное значение тока проводника, А» [13].

«Проверка проводника в послеаварийном (максимальном) режиме работы» [10]:

$$I_{доп} \geq I_{р.\max}, \tag{13}$$

где «$I_{р.max}$ – максимальный ток, А» [10].

«Проводник ВЛ-110 кВ должен быть проверен по механической прочности, а также условиям коронирующего разряда» [10]:

$$F_{ст} \geq F_{мин}, мм^2. \tag{14}$$

Проводится выбор сечения провода новой ВЛ-110 кВ «Таврическая ТЭС – Денисовка».

Расчётный ток нормального режима для данной линии был рассчитан ранее и составляет 105 А.

«Значение аварийного тока линий» [10]:

$$I_{р.ав} = 1,4 \cdot I_р. \tag{15}$$

«Для новой ВЛ-110 кВ «Таврическая ТЭС – Денисовка» [10]:

$$I_{р.ав} = 1,4 \cdot 105 = 147 A.$$

«Сечение проводника для новой ВЛ-110 кВ «Таврическая ТЭС – Денисовка» [10]:

$$F_э = \frac{105}{1,1} \approx 95,5 мм^2.$$

«Для новой ВЛ-110 кВ «Таврическая ТЭС – Денисовка» принимается стандартное сечение провода марки АС-120/19 со стандартным сечением 120 мм^2 и допустимым током 390 А» [4]. «Условие проверки по нормальному режиму для данной ВЛ-110 кВ выполняется» [10]:

$$390 A \geq 105 A.$$

«Условия проверки по максимальному режиму для данной ВЛ-110 кВ также выполняются» [10]:

$$390 A \geq 147 A.$$

«Условия механической прочности для новой ВЛ-110 кВ «Таврическая ТЭС – Денисовка» также соблюдены» [10]:

$$120\ мм^2 = 120\ мм^2.$$

Таким образом, для новой ВЛ-110 кВ «Таврическая ТЭС – Денисовка» принят и проверен провод марки АС-120/19 с допустимым током $I_{доп}$ = 330 А [4].

Результаты выбора и проверки сечений проводников остальных ВЛ-110 кВ, отходящих от ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты выбора и проверки сечений проводников ВЛ-110 кВ, отходящих от ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС

Наименовании линии 110 кВ к потребителю	$I_р$, А	$I_{р.ав}$, А	$S_{ст.}$, мм^2	Марка провода	$I_{доп}$, А
«Таврическая ТЭС – Симферопольская №1»	157,5	220,5	150	АС-150	450
«Таврическая ТЭС – Симферопольская №2»	157,5	220,5	150	АС-150	450
«Таврическая ТЭС – Симферопольская №3»	157,5	220,5	150	АС-150	450
«Таврическая ТЭС – Симферопольская №4»	157,5	220,5	150	АС-150	450
«Таврическая ТЭС – Марьино»	131,2	183,7	120	АС-120	390
«Таврическая ТЭС – Восточная»	105,0	147,0	120	АС-120	390
«Таврическая ТЭС – Кубанская»	157,5	220,5	150	АС-150	450
«Таврическая ТЭС – Денисовка»	105,0	147,0	120	АС-120	390
«Таврическая ТЭС – Строгоновка»	105,0	147,0	120	АС-120	390

В результате проведения расчётов, были выбраны и проверены сечения проводников марки АС-120/19 с допустимым током $I_{доп}$ = 330 А для питания новых ВЛ-110 кВ «Таврическая ТЭС – Денисовка» и «Таврическая ТЭС – Строгоновка» от ОРУ-110 кВ. Также подтверждены проводники на семи существующих линиях 110 кВ, отходящих к потребителям.

Все выбранные проводники показаны в графической части работы.

2.4 Расчёт токов короткого замыкания на шинах ОРУ-110 кВ

Расчёт токов короткого замыкания на шинах распределительного устройства 110 кВ Таврической ТЭС является важным этапом проектирования и эксплуатации системы.

Определение величины токов, возникающих при коротких замыканиях, необходимо для точной настройки релейной защиты и для выбора оборудования, которое будет способно выдерживать данные токи без повреждений.

Величина токов короткого замыкания напрямую зависит от параметров электрической сети, таких как мощность генерации, конфигурация сети, а также параметры линий и трансформаторов.

Расчёт выполняется с учётом различных возможных режимов работы сети, чтобы охватить все сценарии, которые могут возникнуть при аварийных ситуациях, что позволяет выявить максимальные и минимальные значения токов замыкания.

Данный фактор важен для обеспечения надёжной защиты оборудования и минимизации риска возникновения повреждений.

Полученные значения служат основой для выбора уставок релейной защиты, которая должна быстро реагировать на аварийные режимы, чтобы предотвратить распространение неисправности по сети.

Особое внимание уделяется термической и электродинамической стойкости оборудования, которое должно выдерживать воздействие токов короткого замыкания. Также на возможность отключения максимальных токов короткого замыкания проверяются высоковольтные выключатели.

Правильная оценка этих параметров позволяет обеспечить безопасность эксплуатации станции и стабильность работы системы в условиях аварийных ситуаций.

Как было указано ранее, на Таврической ТЭС для питания ОРУ-110 кВ, используются следующие виды оборудования:

– два турбогенератора Г1 и Г2 мощностью 80 МВт и 173,4 МВт соответственно;
– два блочных трансформатора Т1 и Т2 мощностью 125 МВА и 250 МВА соответственно.

Расчётная схема, построенная по однолинейной схеме электрических соединений объекта исследования и представленная на рисунке 3, визуализирует конфигурацию сети и способствует более точным расчётам, что имеет большое значение для успешной реконструкции ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС.

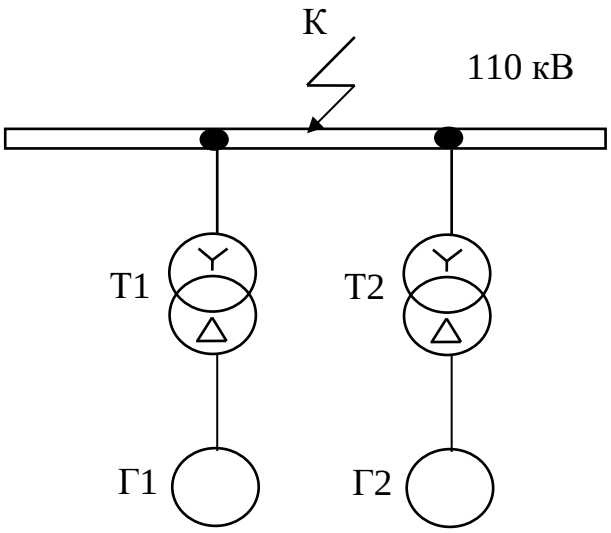

Рисунок 3 – Расчётная схема для расчёта токов короткого замыкания в ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС

Таким образом, основная задача на данном этапе будет состоять в расчёте максимального тока короткого замыкания на шинах ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС.

На рисунке 4 представлена исходная схема замещения для расчёта максимального трёхфазного тока короткого замыкания на шинах ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС.

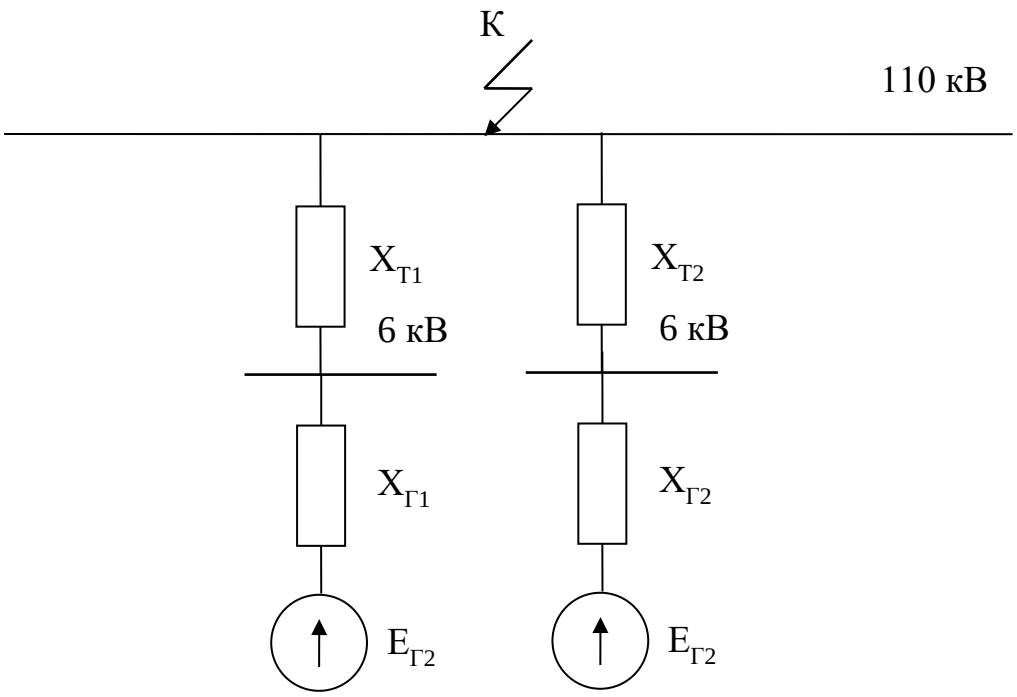

Рисунок 4 – Исходная схема замещения для расчёта токов короткого замыкания в ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС

«На следующем этапе проводится расчёт сопротивлений схемы замещения для дальнейшего расчёта токов КЗ на шинах ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС.

Расчёт параметров схемы замещения производится в относительных единицах при последующем приведении полученных результатов к базисным условиям и переводом в именованные единицы.

Выбираются базисные условия.

Принимается базисная мощность $S_б$=100 МВА, а значение базисного напряжения $U_б$ равным напряжению ступени, на которой рассчитывается ток короткого замыкания, то есть $U_б$ =115 кВ.

Согласно схеме замещения, представленной в работе на рисунке 4, необходимо провести расчёт для двух блочных повышающих трансформаторов Т1 и Т2.

Сопротивления силовых трансформаторов схемы замещения рассчитывается по известному выражению» [11]:

$$X_{T*б} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{S_б}{S_H}, \qquad (16)$$

где $u_к$ – «напряжение короткого замыкания трансформатора, в процентах;

$S_б$ – базисная мощность, МВА;

$S_н$ – номинальная мощность силового трансформатора, МВА» [11].

«Расчёт сопротивления трансформатора Т1 мощностью 125 МВА марки ТДЦ-125000/110» [11], технические данные трансформатора взяты из [12]:

$$X_{T1*б} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{125} = 0,084.$$

«Расчёт сопротивления трансформатора Т1 мощностью 250 МВА марки ТДЦ-250000/110» [11], технические трансформатора данные взяты из [12]:

$$X_{T2*б} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{250} = 0,042.$$

«Сопротивления турбогенераторов схемы замещения» [111]:

$$X_{Г*б} = X''_* \cdot \frac{S_б}{S_{НГ}}, \qquad (17)$$

где «$S_{НГ}$ – «номинальная мощность турбогенераторов, МВА;

X''_* – сверхпереходное индуктивное сопротивление турбогенераторов» [11].

Номинальная мощность турбогенераторов Г1 и Г2:

$$S_{НГ} = \frac{P_{НГ}}{\cos\varphi_{НГ}}, \qquad (18)$$

где $P_{НГ}$ - номинальная активная мощность турбогенератора, МВт:

$\cos\varphi_{НГ}$ - номинальное значение коэффициента активной мощности турбогенератора, о.е.

Для турбогенератора Г1 номинальной активной мощностью 80 МВт:

$$S_{НГ1} = \frac{80}{0,95} = 84,2\ MBA.$$

Для турбогенератора Г2 номинальной активной мощностью 173,4 МВт:

$$S_{НГ2} = \frac{173,4}{0,95} = 182,5\ MBA.$$

Сопротивление турбогенератора Г1 номинальной активной мощностью 80 МВт и полной активной мощностью 84,2 МВА:

$$X_{Г1*} = 0,143 \cdot \frac{100}{84,2} = 0,17.$$

Сопротивление турбогенератора Г2 номинальной активной мощностью 173,4 МВт и полной активной мощностью 182,5 МВА:

$$X_{Г2*} = 0,143 \cdot \frac{100}{182,5} = 0,08.$$

«После расчёта основных сопротивлений схемы замещения, требуется провести упрощение исходной схемы до элементарного уровня.

Проводятся соответствующие преобразования для исходной схемы замещения. Объединяются в эквивалентное сопротивление, сопротивления параллельно включенных трансформаторов Т1 и Т2» [11]:

$$X_1 = \frac{1}{\left(\frac{1}{X_{T1}} + \frac{1}{X_{T2}}\right)}, \tag{19}$$

$$X_1 = \frac{1}{\left(\frac{1}{0,084} + \frac{1}{0,042}\right)} \approx 0,028.$$

«Аналогично для генераторов Г1 и Г2 схемы замещения» [11]:

$$X_2 = \frac{1}{\left(\frac{1}{X_{Г1}} + \frac{1}{X_{Г2}}\right)}, \tag{20}$$

$$X_2 = \frac{1}{\left(\frac{1}{0,17} + \frac{1}{0,08}\right)} \approx 0,054.$$

«Объединяются параллельно включённые источники ЭДС генераторов в один эквивалентный источник с учётом сопротивлений генераторов» [11]:

$$E = \frac{E_1 \frac{1}{X_{Г1}} + E_2 \frac{1}{X_{Г2}}}{\left(E_1 + E_2\right)}, \tag{21}$$

$$E = \frac{1,078 \frac{1}{0,17} + 1,078 \frac{1}{0,08}}{\left(1,078 + 1,078\right)} \approx 9,19$$

«Преобразованная схема замещения для расчёта максимального трёхфазного тока короткого замыкания на шинах ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС» [14] представлена на рисунке 5.

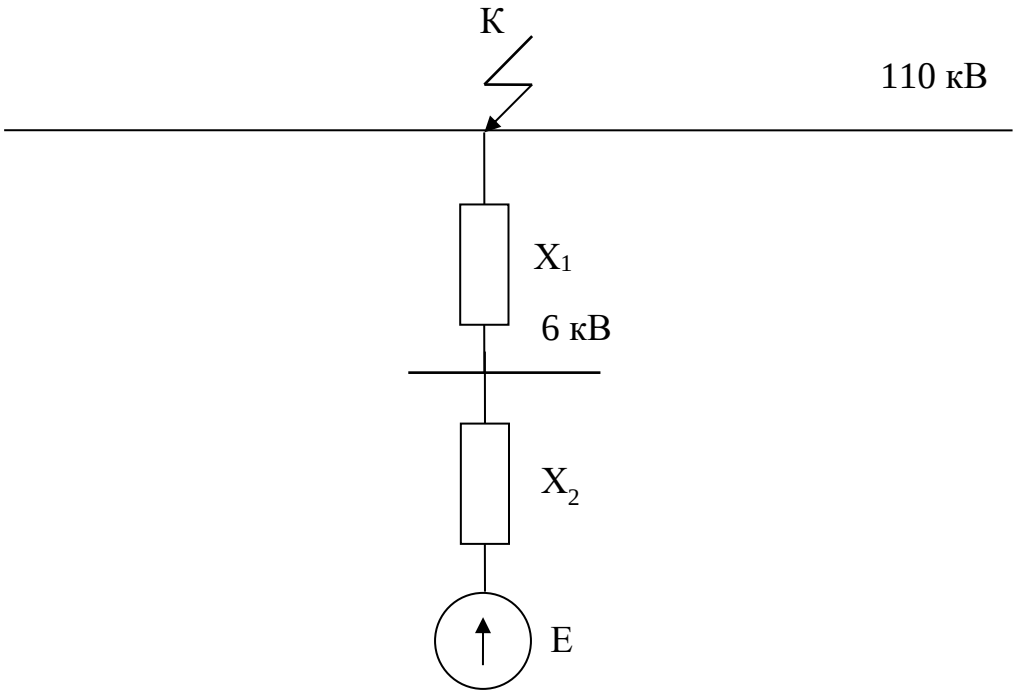

Рисунок 5 – Преобразованная схема замещения для расчёта максимального трёхфазного тока КЗ в ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС

«Суммарное эквивалентное сопротивление турбогенераторов X_2 находится не на основной ступени напряжения, поэтому его необходимо привести к ней, умножив на коэффициент трансформации» [11]:

$$X_2 = 0,054 \cdot \frac{115}{6,3} \approx 0,99.$$

«Тогда два последовательно соединённые сопротивления схемы преобразуются в одно эквивалентное общее сопротивление схемы» [11]:

$$X = X_1 + X_2. \tag{22}$$

$$X = 0,028 + 0,99 = 1,018.$$

«Схема замещения приводится к элементарному виду» [14], показанному на рисунке 6.

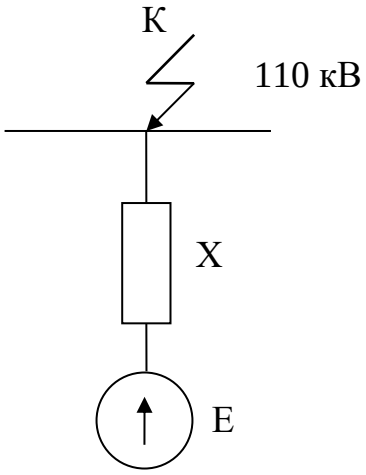

Рисунок 6 – Схема замещения, приведённая к элементарному виду

«Расчёт тока короткого замыкания в расчётной точке К, при приведении к базисной мощности и получением результата в именованных единицах» [11]:

$$I_1^{''} = I_{1nt} = I_{1\infty} = S_б \frac{E}{\sqrt{3} \cdot U_{ст} \cdot X}. \tag{23}$$

$$I_1^{''} = I_{1nt} = I_{1\infty} = 100 \cdot \frac{9{,}19}{\sqrt{3} \cdot 115 \cdot 1{,}018} = 4{,}54\ кА.$$

«Значение ударного тока короткого замыкания на шинах ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС» [11]:

$$i_У = I_1^{''} \cdot \sqrt{2} \cdot K_У, \tag{24}$$

где $K_У$ – «ударный коэффициент тока короткого замыкания» [11].

$$i_У = 4{,}54 \cdot \sqrt{2} \cdot 1{,}65 = 10{,}59\ кА.$$

«Максимальное мгновенное действующее значение тока короткого замыкания на шинах ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС» [11]:

$$I_У = I_{КЗ} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot \left(K_У - 1\right)^2}, \tag{25}$$

$$I_У = 4,54 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,65 - 1)^2} = 6,17\ кА.$$

«Максимальное значение мощности короткого замыкания на шинах ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС» [11]:

$$S_{КЗ} = \sqrt{3} \cdot I_{КЗ} \cdot U_{СТ}. \tag{26}$$

$$S_{КЗ} = \sqrt{3} \cdot 4,54 \cdot 115 = 904,3\ МВА.$$

«Полученные результаты расчёта тока короткого замыкания на шинах 110 кВ в максимальном режиме работы ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС» [14], представлены в форме таблицы 5.

Таблица 5 – Результаты расчёта тока короткого замыкания на сборных шинах 110 кВ в максимальном режиме работы ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС

$U_{СТ}$, кВ	$I_{КЗ}$, кА	$i_У$, кА	$I_У$, кА	$S_{КЗ}$, МВА
115	4,54	10,59	6,17	904,3

Таким образом, получены следующие основные результаты расчёта токов короткого замыкания на шинах ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС:

– максимальный ток трёхфазного короткого замыкания равен 4,54 кА;
– ударный ток трёхфазного короткого замыкания равен 10,59 кА;
– максимальное мгновенное действующее значение тока короткого замыкания составляет 6,17 кА;
– максимальное значение мощности короткого замыкания равно 904,3 МВА.

2.5 Выбор и проверка электрических аппаратов ОРУ-110 кВ

Проводится выбор и проверка электрических аппаратов ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС.

Целью данного расчёта является выбор электрических аппаратов для обеспечения защиты и коммутации двух новых воздушных линий для питания перспективной нагрузки, а также проверка электрических аппаратов, установленных ранее для защиты и коммутации семи существующих линий 110 кВ и вводных присоединений ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС.

Ранее было установлено, что в ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС применяются новейшие аппараты производства ЗАО «ЗЭТО» г. Великие Луки, необходимые для обеспечения защиты и коммутации электрических цепей объекта исследования, следующих марок:

- выключатель ВГТ-110.III-ОП-40/2000 У1 элегазовый колонковый однополюсный на напряжение 110 кВ, номинальный ток 2000 А, ток отключения 40 кА;
- разъединитель РГН.2-110.II/2000-50 УХЛ1 двухколонковый горизонтально-поворотный на напряжение 110 кВ, номинальный ток 2000 А, с двумя комплектами заземляющих ножей;
- разъединитель РГН.2-СК-110.II/2000-50 УХЛ1 двухколонковый горизонтально-поворотный ступенчато-килевой установки на напряжение 110 кВ, номинальный ток 2000 А, с двумя комплектами заземляющих ножей;
- разъединитель РГН.1-110.II/2000-50 УХЛ1 двухколонковый горизонтально-поворотный на напряжение 110 кВ, номинальный ток 2000 А, с одним комплектом заземляющих ножей (РГ1а- 12 комплектов, РГ1б- 12 комплектов);
- разъединитель РГН.1-СК-110.II/2000-50 УХЛ1 двухколонковый горизонтально-поворотный ступенчато-килевой установки на

напряжение 110 кВ, номинальный ток 2000 А, с одним комплектом заземляющих ножей (РГ1а- 4 комплекта, РГ1б- 7 комплектов);

- ограничитель перенапряжений ОПН-П1-110/77/10/3 III УХЛ1 нелинейный однофазный с регистратором срабатывания, изолирующей подставкой, на напряжение 110 кВ, с опорной конструкцией, в составе блока РОТн и/или ОТн;
- трансформатор напряжения ЗНОГ-110.III УХЛ1 измерительный однофазный четырехобмоточный на напряжение 110 кВ, с опорной конструкцией;
- трансформатор напряжения ЗНОГ-110.III У1 измерительный однофазный трехобмоточный на напряжение 110 кВ, с опорной конструкцией;
- трансформатор тока ТОГФ-110-II-0,2S/5P-1600-800-400/1 измерительный однофазный четырехобмоточный на напряжение 110 кВ, с опорной конструкцией, в составе блока ТтВТт.

Так как все аппараты, установленные в ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС – современные и надёжные, не требующие замены, для обеспечения защиты и коммутации двух новых воздушных линий для питания перспективной нагрузки, целесообразно установить электрические аппараты этих же марок.

«Для защиты и коммутации всех электрических цепей в ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС устанавливаются элегазовые высоковольтные выключатели марки ВГТ-110.III-ОП-40/2000 У1 (завод-изготовитель – ЗАО «ЗЭТО») [20].

«Выбор высоковольтных выключателей осуществляется по номинальному напряжению» [6]:

$$U_{уст} \leq U_{н}. \qquad (27)$$

«Выбор выключателей проводится по максимальному рабочему току» [6]:

$$I_{раб.макс} \leq I_н. \quad (28)$$

«Проверка выключателя на симметричный ток отключения» [6]:

$$I_{п\tau} \leq I_{откн}. \quad (29)$$

«где $I_{\pi\tau}$ – периодическая составляющая тока КЗ в момент начала расхождения контактов;

$I_{откн.н}$ – номинальный ток отключения выключателя, кА» [6].

«Проверка выключателя на отключение асимметричного тока КЗ» [6]:

$$(\sqrt{2} \cdot I_{\pi\tau} + i_{a\tau}) \leq \sqrt{2} \cdot I_{отк.н}(1+\beta_н), \quad (30)$$

«где $i_{a\tau}$ – значение апериодической составляющей тока КЗ в момент расхождения контактов;

$\beta_н$ – номинальное значение относительного содержания апериодической составляющей в отключаемом токе КЗ;

τ – наименьшее время от начала КЗ до момента расхождения контактов» [6].

«Наименьшее время от начала КЗ до момента расхождения контактов» [6]:

$$t = t_{з.мин} + t_{с.в}, \quad (31)$$

«где $t_{з.мин}$= 0,01 с – минимальное время действия релейной защиты;

$t_{с.в}$ – собственное время отключения выключателя» [6].

«На электродинамическую устойчивость выбранный выключатель проверяется по значению предельного сквозного тока КЗ» [6]:

$$i_y \le i_{пр.с}, \quad (32)$$

«где $i_{пр.с}$– действующее значение предельного сквозного тока КЗ;

i_y – ударный ток короткого замыкания в цепи выключателя» [6].

«Проверка на термическую стойкость» [6]:

$$B_к \le I_T{}^2 t_T, \quad (33)$$

«где $B_к$ – тепловой импульс, А^2·с;

I_T– ток термической устойчивости, А^2·с;

t_T– время протекания тока термической устойчивости, с» [6].

«Тепловой импульс определяется по известному выражению» [6]:

$$B_к = I_к{}^2 (t_{отк} + T_a). \quad (34)$$

Выбор и проверка электрических аппаратов в работе проводится в сравнительной табличной форме. Результаты выбора и проверки выключателей высокого напряжения для установки в ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты выбора и проверки выключателей высокого напряжения для установки в ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС

Наименование и марка аппарата (модуля)	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные данные аппарата (модуля)
Вводы ОРУ-110 кВ: выключатели ВГТ-110.III-ОП-40/2000 У1	$U_{сети} \le U_{ном}$.	$U_{сети} = 110\ кВ$.	$U_{ном} = 110\ кВ$.
	$I_{\max} \le I_{ном}$.	$I_{\max} = 1837\ А$.	$I_{ном} = 2000\ А$.
	$I_{п.\tau} \le I_{отк.ном}$.	$I_{п.\tau} = 6{,}17\ кА$.	$I_{отк.ном} = 40\ кА$.
	$i_y \le i_{дин.}$.	$i_y = 10{,}59\ кА$.	$i_{дин.} = 31{,}5\ кА$.
	$B_K \le I_T{}^2 \cdot t_T$.	$I_T{}^2 \cdot t_T = 4{,}54^2 \cdot 3 =$ $= 61{,}8\ кА^2 с$.	$B_K = 80^2 \cdot 3 =$ $= 19200\ кА^2 с$.

Продолжение таблицы 6

Наименование и марка аппарата (модуля)	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные данные аппарата (модуля)
Отходящие линии 110 кВ потребителей ОРУ-110 кВ: выключатели ВГТ-110.III-ОП-40/2000 У1	$U_{сети} \le U_{ном}$.	$U_{сети} = 110\ кВ$.	$U_{ном} = 110\ кВ$.
	$I_{\max} \le I_{ном}$.	$I_{\max} = 220{,}5 А$.	$I_{ном} = 2000\ А$.
	$I_{п.\tau} \le I_{отк.ном}$.	$I_{п.\tau} = 6{,}17\ кА$.	$I_{отк.ном} = 40\ кА$.
	$i_y \le i_{дин.}$.	$i_y = 10{,}59\ кА$.	$i_{дин.} = 31{,}5\ кА$.
	$B_K \le I_T^{\ 2} \cdot t_T$.	$I_T^{\ 2} \cdot t_T = 4{,}54^2 \cdot 3 = = 61{,}8\ кА^2 с$.	$B_K = 19200\ кА^2 с$.

«Результаты выбора и проверки разъединителей для установки в ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС» [6], представлены в работе в таблице 7.

Таблица 7 –Результаты выбора и проверки разъединителей

Наименование и марка аппарата (модуля)	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные данные аппарата (модуля)
Разъединители ОРУ-110 кВ: РГН.2-110.II/2000-50 УХЛ1, РГН.2-СК-110.II/2000-50 УХЛ1, РГН.1-110.II/2000-50 УХЛ1, РГН.1-СК-110.II/2000-50 УХЛ1	$U_{сети} \le U_{ном}$.	$U_{сети} = 110\ кВ$.	$U_{ном} = 110\ кВ$.
	$I_{\max} \le I_{ном}$.	$I_{\max} = 1837 А$.	$I_{ном} = 2000\ А$.
	$i_y \le i_{дин.}$.	$i_y = 10{,}59\ кА$.	$i_{дин.} = 50\ кА$.
	$B_K \le I_T^{\ 2} \cdot t_T$.	$I_T^{\ 2} \cdot t_T = 4{,}54^2 \cdot 3 = = 61{,}8\ кА^2 с$.	$B_K = 50^2 \cdot 3 = = 7500\ кА^2 с$.

Результаты выбора и проверки трансформаторов тока для установки в ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты выбора трансформаторов тока для установки в ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС

Тип ТТ	$\frac{I_н}{I_{уст}}, А$	$\frac{U_н}{U_{уст}}, кВ$	$\frac{S_н}{S_{2\sum}}, ВА$	Класс точности	$\frac{i_y}{i_{дин.}}, кА$	$\frac{B_K}{I_T^{\ 2} \cdot t_T}, кА^2 с$
ТОГФ-110-II-0,2S/5P-1600-800-400/1	50 / 43,89	110 / 110	300,0 / ≤300,0	1,0	2,42 / 31,5	4,76 / 19200

Результаты выбора трансформаторов напряжения для установки в ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты выбора трансформаторов напряжения для установки в ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС

Тип ТН	Кол-во ТН	Мощность на один ТН, ВА	Класс точности	$\frac{U_н}{U_{уст}}$, кВ	$\frac{S_н}{S_{2\sum}}$, ВА
ЗНОГ-110.III УХЛ1	3	600/2	1,0	$\frac{110}{110}$	$\frac{1200,0}{\leq 1200,0}$

Результаты выбора и проверки ограничителей перенапряжения для установки в ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Результаты выбора и проверки ограничителей перенапряжения для установки в ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС

Наименование и марка аппарата (модуля)	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные данные аппарата (модуля)
ОПН-П1-110/77/10/3 III УХЛ1	$U_{сети} \leq U_{ном}$.	$U_{сети} = 110\ кВ.$	$U_{ном} = 110\ кВ.$
	$I_{\max} \leq I_{ном}$	$I_{\max} = 43,89 А.$	$I_{ном} = 800\ А$
	$I_{п.\tau} \leq I_{макс.проп.}$	$I_{п.\tau} = 1,26\ кА.$	$I_{макс.проп.} = 146\ кА$
	$i_у \leq i_{дин.}$	$i_у = 2,42\ кА.$	$i_{дин.} = 10\ кА.$

Таким образом, в работе были выбраны электрические аппараты для обеспечения защиты и коммутации двух новых воздушных линий для питания перспективной нагрузки. Также проведена проверка электрических аппаратов, установленных ранее для защиты и коммутации семи существующих линий 110 кВ и вводных присоединений ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС.

Расчётным путём установлено, что в ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС подтверждено применение новейших аппаратов производства ЗАО «ЗЭТО» г. Великие Луки, необходимых для обеспечения защиты и коммутации электрических цепей объекта исследования, следующих марок:

– выключатели ВГТ-110.III-ОП-40/2000 У1 элегазовые колонковые однополюсные на напряжение 110 кВ, номинальный ток 2000 А, ток отключения 40 кА;
– разъединители РГН.2-110.II/2000-50 УХЛ1 двухколонковые горизонтально-поворотные на напряжение 110 кВ, номинальный ток 2000 А, с двумя комплектами заземляющих ножей;
– разъединители РГН.2-СК-110.II/2000-50 УХЛ1 двухколонковые горизонтально-поворотные ступенчато-килевой установки на напряжение 110 кВ, номинальный ток 2000 А, с двумя комплектами заземляющих ножей;
– разъединители РГН.1-110.II/2000-50 УХЛ1 двухколонковые горизонтально-поворотные на напряжение 110 кВ, номинальный ток 2000 А, с одним комплектом заземляющих ножей (РГ1а- 12 комплектов, РГ1б- 12 комплектов);
– разъединители РГН.1-СК-110.II/2000-50 УХЛ1 двухколонковые горизонтально-поворотные ступенчато-килевой установки на напряжение 110 кВ, номинальный ток 2000 А, с одним комплектом заземляющих ножей (РГ1а- 4 комплекта, РГ1б- 7 комплектов);
– ограничители перенапряжений ОПН-П1-110/77/10/3 III УХЛ1 нелинейные однофазные с регистратором срабатывания, изолирующей подставкой, на напряжение 110 кВ, с опорной конструкцией, в составе блока РОТн и/или ОТн;
– трансформаторы напряжения ЗНОГ-110.III У1 измерительные однофазные (четырехобмоточные и трехобмоточные) на напряжение 110 кВ, с опорной конструкцией;
– трансформаторы тока ТОГФ-110-II-0,2S/5P-1600-800-400/1измерительные однофазные (четырехобмоточные) на напряжение 110 кВ, с опорной конструкцией, в составе блока ТтВТт.

Выводы по разделу 2.

Проведено техническое обоснование мероприятий по реконструкции силовой части ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, в результате чего обоснованы и подтверждены основные решения по выбору и проверке основного оборудования на новых линиях 110 кВ, отходящих к потребителям, а также проверено на соответствие расчётным параметрам сети оборудование объекта исследования.

В результате расчёта электрических нагрузок, определены значения нагрузок отдельных потребителей отходящих линий ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС.

Расчётным путём установлено, что суммарные расчётные нагрузки ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, определённые с учётом одновременности максимума нагрузки, будут равны:

- суммарная активная нагрузка – 156,8 МВт;
- суммарная реактивная нагрузка – 112,8 Мвар;
- суммарная полная нагрузка – 193,2 МВА;
- суммарный расчётный ток нормального режима – 1014 А.

Расчётным путём установлено, что силовые трансформаторы марки ТДЦ-125000/110 и ТДЦ-250000/110, питающие ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к их системе охлаждения по нагрузочной способности, что подтверждает их пригодность для питания ОРУ-110 кВ с учётом подключения и ввода в эксплуатацию двух линий для питания перспективной нагрузки потребителей 110 кВ на объекте исследования.

В результате проведения расчётов, были выбраны и проверены сечения проводников марки АС-120/19 с допустимым током $I_{доп}$ = 330 А для питания новых ВЛ-110 кВ «Таврическая ТЭС – Денисовка» и «Таврическая ТЭС – Строгоновка» от ОРУ-110 кВ. Также подтверждены проводники на семи существующих линиях 110 кВ, отходящих к потребителям.

Получены следующие основные результаты расчёта токов короткого замыкания на шинах ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС в максимальном режиме работы станции:

- максимальный ток трёхфазного короткого замыкания равен 4,54 кА;
- ударный ток трёхфазного короткого замыкания равен 10,59 кА;
- максимальное мгновенное действующее значение тока короткого замыкания составляет 6,17 кА;
- максимальное значение мощности короткого замыкания равно 904,3 МВА.

В работе были выбраны электрические аппараты для обеспечения защиты и коммутации двух новых воздушных линий для питания перспективной нагрузки.

Также проведена проверка электрических аппаратов, установленных ранее для защиты и коммутации семи существующих линий 110 кВ и вводных присоединений ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС.

Расчётным путём установлено, что в ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС подтверждено применение новейших аппаратов производства ЗАО «ЗЭТО» г. Великие Луки, необходимых для обеспечения защиты и коммутации электрических цепей объекта исследования, следующих марок:

- выключатели ВГТ-110.III-ОП-40/2000 У1 элегазовые колонковые однополюсные на напряжение 110 кВ, номинальный ток 2000 А, ток отключения 40 кА;
- разъединители РГН.2-110.II/2000-50 УХЛ1 двухколонковые горизонтально-поворотные на напряжение 110 кВ, номинальный ток 2000 А, с двумя комплектами заземляющих ножей;
- разъединители РГН.2-СК-110.II/2000-50 УХЛ1 двухколонковые горизонтально-поворотные ступенчато-килевой установки на напряжение 110 кВ, номинальный ток 2000 А, с двумя комплектами заземляющих ножей;

– разъединители РГН.1-110.II/2000-50 УХЛ1 двухколонковые горизонтально-поворотные на напряжение 110 кВ, номинальный ток 2000 А, с одним комплектом заземляющих ножей (РГ1а- 12 комплектов, РГ1б- 12 комплектов);
– разъединители РГН.1-СК-110.II/2000-50 УХЛ1 двухколонковые горизонтально-поворотные ступенчато-килевой установки на напряжение 110 кВ, номинальный ток 2000 А, с одним комплектом заземляющих ножей (РГ1а- 4 комплекта, РГ1б- 7 комплектов);
– ограничители перенапряжений ОПН-П1-110/77/10/3 III УХЛ1 нелинейные однофазные с регистратором срабатывания, изолирующей подставкой, на напряжение 110 кВ, с опорной конструкцией, в составе блока РОТн и/или ОТн;
– трансформаторы напряжения ЗНОГ-110.III У1 измерительные однофазные (четырехобмоточные и трехобмоточные) на напряжение 110 кВ, с опорной конструкцией;
– трансформаторы тока ТОГФ-110-II-0,2S/5P-1600-800-400/1измерительные однофазные (четырехобмоточные) на напряжение 110 кВ, с опорной конструкцией, в составе блока ТтВТт.

3 Техническое обоснование мероприятий по реконструкции вторичных цепей ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС

3.1 Выбор системы контроля и учёта электроэнергии

Для учета электроэнергии в ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС предусмотрена система коммерческого учета электрической энергии (АИИС КУЭ) для решения следующих задач:

- получения достоверной информации о количестве электроэнергии, выработанной генераторами, потребленной на собственные и хозяйственные нужды, отпущенной в сети других собственников;
- определение и прогнозирование всех составляющих баланса электроэнергии;
- определения учетных показателей, используемых при расчете за электроэнергию и услуги на ОРЭ;
- формирования базы расчетных данных и базы событий, используемой для мониторинга АИИС КУЭ;
- обмена информацией с заинтересованными участниками ОРЭ по согласованному формату и регламенту.

Целью создания данной системы является обеспечение руководства Симферопольской ТЭС, ОАО «АТС», ГУП РК «Крымэнерго», а также других заинтересованных субъектов ОРЭ данными о количестве выработанной, полученной, потреблённой на собственные нужды и отпущенной потребителям (абонентам) электроэнергии на Таврической ТЭС для осуществления взаиморасчетов на оптовом рынке электроэнергии (ОРЭ).

Система предназначена для сбора, обработки и хранения результатов измерений количества электрической энергии выработанной, полученной, потребленной на собственные нужды и отпущенной потребителям электроэнергии на Таврической ТЭС, осуществления контроля за

энергопотреблением, регистрации параметров энергопотребления, проведения расчетов в объеме оказываемых услуг.

Определение значений показателей коммерческого учёта должно выполняться путем проведения измерений электроэнергии, выработанной генераторами, отпущенной в сети, на границе балансовой принадлежности между Таврической ТЭС и электросетевыми организациями и электроэнергии, потребленной на собственные нужды. При этом количество точек измерений должно обеспечивать получение баланса электроэнергии по шинам распределительных устройств всех классов напряжения по отдельности и по всему объекту в целом.

Система применяется должностными лицами Таврической ТЭС при организации расчётов за выработанную, отпущенную в электрические сети и потреблённую на собственные нужды электроэнергию.

Технические решения, принятые при проектировании системы соответствуют действующим нормам, техническим регламентам и правилам техники безопасности, пожаробезопасности и взрывобезопасности.

АИИС КУЭ ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС включает в себя следующие уровни:

- уровень информационно-измерительных комплексов точек измерений (далее – ИИК);
- уровень информационно-вычислительного комплекса электроустановки (далее – ИВКЭ);
- уровень информационно-вычислительного комплекса (далее – ИВК).

Первый уровень включает в себя измерительные трансформаторы тока и напряжения, многофункциональные микропроцессорные счетчики активной и реактивной электроэнергии, вторичные измерительные цепи.

Второй уровень включает в себя устройства сбора и передачи данных (УСПД), технические средства приема и передачи данных (каналообразующая аппаратура).

Третий уровень включает в себя сервер сбора данных.

В составе системы реализована система обеспечения единого времени (СОЕВ), выполняющая функцию измерения времени и синхронизации времени на уровнях ИИК (в электросчётчиках), ИВКЭ (в промконтроллере) и ИВК (на сервере сбора данных). Сигналы точного времени СОЕВ получает от устройства синхронизации времени (УСВ), входящего в состав ИВК АИИС КУЭ Таврической ТЭС и синхронизируемого по сигналам GPS.

Проектом предусматривается установка АРМ АИИС КУЭ на БЩУ и переносного инженерного пульта (ноутбука).

Система имеет гибкую структуру, позволяющую производить её наращивание, замену устаревших средств измерений без существенной перестройки структуры системы.

Предусматривается установка точек коммерческого и технического учета электроэнергии на следующих присоединениях ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС:

- В ОРУ-110 кВ, на присоединениях «Таврической ТЭС – Восточная», «Таврическая ТЭС – Кубанская», «Таврическая ТЭС – Марьино», «Таврическая ТЭС – ПС Симферопольская I цепь»; «Таврическая ТЭС – ПС Симферопольская II цепь»; «Таврическая ТЭС – ПС Симферопольская III цепь»; «Таврическая ТЭС – ПС Симферопольская IV цепь», обходного выключателя ОРУ 110 кВ, а также на двух новых отходящих линиях к перспективной нагрузке 110 кВ «Таврическая ТЭС – Денисовка» и «Таврическая ТЭС – Строгоновка»;
- на стороне высокого напряжения повышающих блочных трансформаторов, питающих ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС.

В ИИК системы используются счётчики типа Альфа A1802RAL-P4GB-DW-4, производимые фирмой ООО «Эльстер Метроника» [1] и показанные на рисунке 7.

Рисунок 7 – Счётчик Альфа A1802RAL-P4GB-DW-4 (ООО «Эльстер Метроника»)

Счетчики электрической энергии многофункциональные A1802RAL-P4GB-DW-4 выполняют следующие функции [1]:

– многотарифный учет активной и реактивной электрической энергии прямого и обратного направления в четырехпроводных сетях переменного тока частотой 50(±2,5) Гц на объектах энергетики;
– измерение мгновенных значений физических величин, характеризующих трехфазную электрическую сеть: активной, реактивной и полной мощности, фазных и межфазных напряжений, тока, коэффициента мощности, частоты сети;
– формирование до восьми массивов профиля мощности с программируемым временем интегрирования от 1 до 30 минут. Глубина хранения каждого массива профиля мощности при времени интегрирования 30 минут составляет не меннее 3 месяцев;
– ведение журналов событий, показателей качества электричества, статусного журнала.

Программирование счетчика и доступ к измерительной информации осуществляется по интерфейсам RS-485 или через оптопорт. Счетчик A1802RAL-P4GB-DW-4 имеет возможность подключения резервного питания переменным напряжением 220 В.

Во всех ИИК устанавливаются трансформаторы тока (ТТ) в каждой из трёх фаз. ТТ и ТН, применяемые для учета электроэнергии должны иметь сертификат об утверждении типа средств измерений и быть включены в Государственный реестр средств измерений.

Вторичные цепи трансформаторов тока и напряжения для учета электроэнергии подключаются к счетчикам электроэнергии через коробки переходные испытательные, имеющие возможность пломбирования.

Измерительные цепи в измерительных комплексах коммерческого учёта будут проложены медными контрольными кабелями. Проектом предусматривается защита вторичных цепей трансформаторов тока и напряжения от несанкционированного доступа путем пломбирования клемм вторичных цепей знаками визуального контроля.

Информация с УСПД поступает на уровень ИВК АИИС КУЭ Таврической ТЭС. Передача данных с УСПД на ИВК осуществляется по двум каналам. В качестве основного канала связи используется фрагмент локально-вычислительной сети предприятия. В качестве резервного канала используется передача данных по телефонной сети предприятия через цифровую АТС Таврической ТЭС.

Процесс деятельности в условиях функционирования системы состоит из двух основных процедур: получение данных о выработанной, принятой, отпущенной в электрические сети и потребленной на собственные нужды Таврической ТЭС электрической энергии и предоставление этих данных внешним потребителям.

Процедура получения данных о потребленной электрической энергии является полностью автоматизированной и состоит из различных

взаимосвязанных автоматических операций измерения, обработки и хранения данных.

Процедура передачи данных на высшие уровни происходит с участием оператора. Система предоставляет данные в виде экранных форм и печатных документов, а также в виде файлов данных.

К процессу деятельности в условиях функционирования системы также относятся техническое обслуживание компонентов системы, использование работниками Таврической ТЭС данных учета, предоставляемых системой, в своей повседневной деятельности.

3.2 Выбор системы релейной защиты и автоматики ОРУ-110 кВ

Выбор принципов и типов устройств релейной защиты и автоматики выполняется на основании действующих норм и правил [10], руководящих материалов по релейной защите, директивных материалов и рекомендаций заводов-изготовителей электрооборудования.

Проектная номенклатура релейной защиты по всем видам присоединений соответствует требованиям.

Применение микропроцессорных (МП) устройств РЗА, с точки зрения имеющихся функций, перекрывают указанные требования. Микропроцессорные терминалы контролируют режимы работы и выполняют полноценную защиту оборудования при аварийных и ненормальных режимах работы.

Для защит линий 110 кВ, включая новые линии перспективной нагрузки, предполагается использование терминалов серии БЭ, на базе которых формируются типовые шкафы защит типа ШЭ ООО НПО «ЭКРА», которые имеют экспертные заключения на соответствие функциональных и технических показателей оборудования условиям эксплуатации и действующим отраслевым требованиям.

Таким образом, для защиты линий 110 кВ ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС выбраны современные отечественные «шкафы защит линий электропередач 110-750 кВ ШЭ2607 и ШЭ2710» [19], которые представлены на рисунке 8.

Рисунок 8 – Шкафы защит линий электропередач 110-750 кВ ШЭ2607 и ШЭ2710

Помимо функций основного назначения при выборе устройств РЗА учитывалась:

- возможность их использования в качестве устройств сопряжения с объектом и ввода необходимого объема информации в АСУТП по цифровым каналам связи с поддержкой протокола IEC-61850;
- наличие дополнительных функций: осциллографирование, регистрация событий, тестовый и функциональный контроль исправности и др.

В соответствии с требованиями нормативных документов и в необходимом объеме устройствами РЗА будет оснащено следующее основное оборудование ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС:

– оборудование ОРУ-110 кВ;
– все отходящие линии 110 кВ;
– питающий повышающий блочный трансформатор генератора Г1 мощностью 250 МВА, напряжением 121/10,5 кВ;
– питающий повышающий блочный трансформатор генератора Г2 мощностью 125 МВА, напряжением 121/10,5 кВ;
– элементы РУ СН 110 кВ.

Повышение надежности РЗА всех элементов ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС обеспечивается выполнением ближнего резервирования, которое предусматривает:

– установку двух комплектов основных защит (быстродействующих защит от всех видов КЗ);
– использование УРОВ;
– размещение устройств, резервирующих друг друга в разных шкафах;
– разделение комплектов защит по цепям переменного тока, напряжения и цепям оперативного тока;
– действие устройств РЗА (1-ый, 2-ой комплекты, основные, резервные защиты) при срабатывании на оба электромагнита отключения выключателей.

Надежное и быстрое отключение всех видов КЗ обеспечено применением:

– двух дублирующих друг друга основных защит систем шин 110 кВ и УРОВ 110 кВ;
– двух дублирующих друг друга основных защит ошиновки 110 кВ;
– независимых источников постоянного оперативного тока дублирующих комплектов защит элементов ОРУ-110 кВ.

Дублирующие комплекты защит присоединены к разным вторичным обмоткам трансформаторов тока, отдельные входные и выходные цепи, а также отдельные цепи сигнализации.

Устройства РЗА размещаются в типовых шкафах, которые устанавливаются на релейных щитах и в релейных отсеках шкафов.

Для управления, измерений, сигнализации, регистрации электрической части на Таврической ТЭС используется компьютерная автоматизированная система управления и мониторинга АСУТП с автоматизированными рабочими местами и базовым сервером, реализуемая на средствах ТПТС-НТ (производитель – ФГУП «ВНИИ автоматики им. Н.Л. Духова», г. Москва).

В оперативном контуре на ЦЩУ организуются:

– АРМ начальника смены станции (АРМ НСС);
– АРМ начальника смены электроцеха (АРМ НС ЭЦ);
– АРМ дежурного электроцеха (АРМ ДЭЦ).

В помещении АРМ инженера РЗА здания РЩ ОРУ-110 кВ – АРМ инженера РЗА (стационарный и переносной). В неоперативном контуре ЦЩУ будет предусмотрен АРМ инженера-наладчика МП РЗА.

На видеограммах АРМ НС ЭЦ и АРМ ДЭЦ отображается мнемосхема Таврической ТЭС, списки сигналов неисправностей, предупреждений, тревог и аварий, «окна» управления коммутационными и регулируемыми аппаратами.

На видеограммы АРМа инженера РЗА выводится полная информация, считываемая с МП терминалов, в том числе осциллограммы.

– АРМ инженера РЗА позволяет производить:
– анализ аварийных ситуаций (просмотр осциллограмм, записываемых в МП РЗА, установленных в РЩ ОРУ-110 кВ);
– дистанционный контроль и изменение уставок объектов РЗА;
– локальный контроль, наладку и параметрирование устройств МП РЗА.

Для элементов главной схемы, питающих элементов собственных нужд и распределительных устройств различных напряжений сигнализация в пунктах централизованного управления выполняется в следующем объеме:

– сигнализация положения объектов управления;

– индивидуальная сигнализация аварийного отключения;
– предупредительная сигнализация об отклонении от нормального режима работы оборудования и о нарушении исправности цепей;
– сигнализация вызова персонала в помещении различных электротехнических устройств и местных щитов, не имеющих постоянного дежурного персонала, действующая при нарушениях нормального режима работы этих устройств или неисправностях в них.

Для элементов главной схемы, питающих элементов собственных нужд предусматриваются устройство автоматического повторного включения (АПВ) линий 110 кВ и устройство бесперебойного питания особо ответственных потребителей.

Объектами управления АСУ ТП в электрической части ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС являются выключатели и электроприводы разъединителей и заземляющих ножей ОРУ 110 кВ.

От ошибочных операций с разъединителями и заземляющими ножами предусматриваются оперативные программные (логические) блокировки в полном объеме, реализуемые в контроллерах присоединений в составе АСУ ТП ЭТО с использованием блокировочных элементов приводов.

Питание цепей оперативной блокировки разъединителей выполняется на выпрямленном оперативном токе.

Управление коммутационными аппаратами элементов главной схемы - выключателями ОРУ 110 кВ, генераторными выключателями, линейными разъединителями, заземляющими разъединителями осуществляется на ЦЩУ с АРМ НС ЭЦ.

Кроме того, в ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС предусмотрены резервные места управления коммутационной аппаратурой элементов главной схемы энергоблока (выключателей, разъединителей, заземляющих ножей):

– дистанционное, со шкафов управления ячейками, которые будут устанавливаться на РЩ ОРУ-110 кВ и РЩ главного корпуса;

– местное, со шкафов местного управления (ОРУ-110 кВ). Используется для проведения наладочных работ и является аварийным способом отключения выключателя.

Шкафы с микропроцессорными терминалами управления элементов главной схемы выдачи мощности (высоковольтными выключателями, линейными разъединителями, заземляющими разъединителями) устанавливаются в помещении релейного щита ОРУ 110 кВ.

Выводы по разделу.

Для учета электроэнергии в ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС предусмотрена система коммерческого учета электрической энергии (АИИС КУЭ) с применением современных микропроцессорных счётчиков типа Альфа A1802RAL-P4GB-DW-4, производимых фирмой ООО «Эльстер Метроника».

Для защит линий 110 кВ, включая новые линии перспективной нагрузки, предполагается использование терминалов серии БЭ, на базе которых формируются типовые шкафы защит типа ШЭ ООО НПО «ЭКРА», имеющие экспертные заключения на соответствие функциональных и технических показателей оборудования условиям эксплуатации и действующим отраслевым требованиям.

С учётом этого, для защиты линий 110 кВ ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС выбраны современные отечественные «шкафы защит линий электропередач 110-750 кВ ШЭ2607 и ШЭ2710».

Для управления, измерений, сигнализации, регистрации электрической части на Таврической ТЭС, в том числе в ОРУ-110 кВ, рекомендована к использованию компьютерная автоматизированная система управления и мониторинга АСУТП с автоматизированными рабочими местами и базовым сервером, реализуемая на средствах ТПТС-НТ (производитель – ФГУП «ВНИИ автоматики им. Н.Л. Духова», г. Москва).

4 Расчёт молниезащиты и заземления ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС

4.1 Расчёт молниезащиты ОРУ-110 кВ

Расчёт молниезащиты распределительного устройства 110 кВ Таврической ТЭС является важной задачей для обеспечения стабильной и безопасной работы энергетического объекта.

Актуальность данной проблемы связана с высокой вероятностью попадания молнии в оборудование, находящееся на открытом воздухе, что может привести к серьёзным последствиям, включая выход из строя элементов системы, перебои в энергоснабжении и даже аварийные ситуации.

Надёжная молниезащита необходима для предотвращения прямых ударов молнии в оборудование и минимизации рисков связанных с этим повреждений.

Необходимость разработки системы молниезащиты продиктована требованиями к бесперебойной и безопасной эксплуатации высоковольтных объектов, таких как ОРУ-110 кВ. Попадание молнии в оборудование может вызвать кратковременные перенапряжения, которые способны вывести из строя как сами элементы сети, так и другие связанные с ними системы. Данный аспект особенно важен для объектов, обеспечивающих крупные регионы, так как даже кратковременные отключения могут привести к значительным экономическим потерям и нарушению электроснабжения потребителей.

Расчёт молниезащиты учитывает географические и климатические особенности региона, интенсивность грозовой активности, высоту и расположение оборудования, что позволяет разработать систему, способную эффективно отводить токи молнии и предотвращать их разрушительное воздействие.

Реализация надёжной молниезащиты является необходимым условием для поддержания долгосрочной надёжности и безопасности эксплуатации Таврической ТЭС.

Таким образом, надёжная система молниезащиты является необходимым условием для безопасной и стабильной работы распределительного устройства 110 кВ Таврической ТЭС, защищая как оборудование, так и персонал от воздействия атмосферных и электрических разрядов.

«Защита ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС осуществляется стержневыми молниеотводами.

На высоте защищаемого объекта (наиболее выступающие части оборудования и конструкций ОРУ-110 кВ) радиус действия молниеотвода определяется по формуле» [17]:

$$r_x = \frac{1,6 \cdot h_a}{1 + \frac{h_x}{h}} \cdot p, \tag{35}$$

«где h – высота молниеотвода;

h_a – активная высота молниеотвода;

h_x - высота наиболее выступающих элементов ОРУ-110 кВ;

p – коэффициент, равный единице при высоте молниеотвода h<30м» [17].

«Для системы молниезащиты ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС» [17]:

$$h_a = h - h_x = 24 - 12 = 12 м.$$

$$r_x = \frac{1,6 \cdot 12}{1 + \frac{12}{24}} \cdot 1 = 12,8 м.$$

«Наименьшая ширина зоны защиты b_x ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС определяется по формуле» [17]:

$$b_x = 4 \cdot r_x \cdot \frac{7h_a - 1}{14h_a - a}. \quad (36)$$

«Расстояние от оси установки молниеотводов системы молниезащиты ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС до границы защищаемой зоны» [17]:

$$b_{x1} = 4 \cdot 12{,}8 \cdot \frac{7 \cdot 12 - 40}{14 \cdot 12 - 40} = 17{,}6 м,$$

$$b_{x2} = 4 \cdot 12{,}8 \cdot \frac{7 \cdot 12 - 42}{14 \cdot 12 - 42} = 17{,}1 м.$$

«Условие для защиты объекта высотой h_x внутри зоны защиты» [17]:

$$D \le 8 \cdot h_a \cdot p, \quad (37)$$

«где D – наибольшая диагональ четырехугольника» [17].

$$D = \sqrt{40^2 + 42^2} = 58 м.$$

«Проверяется условия соответствия системы молниезащиты ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС минимальным условиям надёжности» [17]:

$$D \le 8 \cdot 12 \cdot 1 = 96 м.$$

$$58 м \le 96 м.$$

«Условия соответствия системы молниезащиты ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС минимальным условиям надёжности выполняются.

Следовательно, система молниезащиты объекта рассчитана верно и может быть рекомендована к использованию на объекте.

Таким образом, окончательно принимается к установке на объекте четыре молниеотвода высотой 24 м» [17].

4.2 Расчёт контура заземления ОРУ-110 кВ

Расчёт контура заземления распределительного устройства 110 кВ Таврической ТЭС имеет решающее значение для обеспечения безопасной эксплуатации энергетического объекта и защиты оборудования от повреждений.

Актуальность этого вопроса обусловлена необходимостью отвода токов короткого замыкания, молниевых разрядов и других перенапряжений, которые могут возникать в процессе эксплуатации высоковольтных систем. Без надёжного заземления существует риск повреждения оборудования и угрозы жизни персонала, обслуживающего объект.

Необходимость расчёта контура заземления связана с требованиями к электробезопасности и надёжности работы оборудования на высоковольтных объектах. Контур заземления должен обеспечивать безопасное распределение токов в земле, чтобы предотвратить возникновение опасных потенциалов на поверхности и минимизировать вероятность поражения электрическим током. Выполнение данного условия особенно важно в условиях высокой концентрации токопроводящих элементов и мощного оборудования, характерных для ОРУ-110 кВ.

Правильный расчёт заземляющего контура учитывает сопротивление грунта, климатические условия, характеристики оборудования и геологические особенности участка. Надёжная система заземления обеспечивает защиту от перенапряжений, гарантирует безопасные условия эксплуатации и снижает риски, связанные с выходом из строя оборудования в случае аварийных ситуаций.

Таким образом, расчёт и реализация контура заземления являются необходимыми элементами для обеспечения безопасности и надёжности функционирования Таврической ТЭС.

«Допустимое время воздействия электрического тока на организм людей» [10]:

$$\tau_в = t_{р.з.} + t_{отк.в}, с. \quad (38)$$

«Для условий ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, с учётом наличия быстродействующей релейной защиты, отключающей выключатели в ОРУ-110 кВ Таврической ТЭСв случае попадания человека под действующее напряжение» [10]:

$$\tau_в = 0,1 + 0,035 = 0,135\, с.$$

«Сопротивление растекания тока от ступней человека» [10]:

$$R_c = 1,5 \cdot \rho, Ом, \quad (39)$$

$$R_c = 1,5 \cdot 0,009 = 0,0135\, Ом.$$

«Коэффициент сопротивления тела человека с учётом растекания тока от ступней» [10]:

$$\beta = \frac{R_ч}{R_ч + R_c}, \quad (40)$$

$$\beta = \frac{1000}{1000 + 0,0135} = 0,99.$$

«Суммарная длина горизонтального заземлителя ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС» [10]:

$$L_r = \frac{130}{5} \cdot 48 + \frac{48}{5} \cdot 130 = 2496 м.$$

«Коэффициент напряжения прикосновения на ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС» [10]:

$$K_п = \frac{M \cdot \beta}{\left(\frac{l_в \cdot L_r}{a \cdot \sqrt{S}}\right)^{0,45}}. \quad (41)$$

$$K_п = \frac{0,5 \cdot 0,99}{\left(\frac{5 \cdot 2496}{5 \cdot \sqrt{130 \cdot 48}}\right)^{0,45}} = 0,105.$$

«Напряжение на заземлителе контура заземления ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС» [10]:

$$U_з = \frac{U_{пр.доп.}}{K_п}, кВ, \quad (42)$$

$$U_з = \frac{400}{0,105} = 3810 В = 3,81 кВ.$$

«Сопротивление заземляющего устройства ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС» [10]:

$$R_{з.доп.} = \frac{U_з}{I_з}, Ом, \quad (43)$$

$$R_{з.доп.} = \frac{3,81}{1,3} = 2,931 Ом.$$

«Число ячеек по стороне квадрата контура заземления ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС» [10]:

$$m = \frac{L_r}{2 \cdot \sqrt{S}} - 1, \quad (44)$$

$$m = \frac{2496}{2 \cdot \sqrt{130 \cdot 48}} - 1 = 14,8.$$

«Принимается m=15.

Длина полос в проектируемом контуре заземления ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС» [10]:

$$L_r^{15} = 2 \cdot \sqrt{S} \cdot (m+1), м, \quad (45)$$

$$L_r^{15} = 2 \cdot \sqrt{130 \cdot 48} \cdot (15+1) = 2528 м.$$

«Длина сторон ячеек в проектируемом контуре заземления ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС» [10]:

$$b = \frac{\sqrt{S}}{m}, м, \quad (46)$$

$$b = \frac{\sqrt{130 \cdot 48}}{15} = 5,5 м.$$

«Число вертикальных заземлителей по периметру контура заземления ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС» [10]:

$$n_в = \frac{\sqrt{S} \cdot 4}{\frac{a}{l_в} \cdot l_в}, \quad (47)$$

$$n_в = \frac{\sqrt{130 \cdot 48} \cdot 4}{5} = 63,2.$$

«Принимается для проектируемого контура заземления ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС целое число вертикальных заземлителей $n_в$=64.

При этом общая длина вертикальных заземлителей в контуре заземления ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС» [10]:

$$L_в = l_в \cdot n_в, м, \quad (48)$$

$$L_в = 5 \cdot 64 = 320 м.$$

«Относительная глубина заложения сетки электродов» [10]:

$$A = 0,444 - 0,84 \cdot \frac{l_в + t}{\sqrt{S}}, м, \quad (49)$$

$$A = 0,444 - 0,84 \cdot \frac{5 + 0,7}{\sqrt{130 \cdot 48}} = 0,384 \ м.$$

«Общее сопротивление сложного заземлителя» [10]:

$$R_з = A \cdot \frac{\rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{L_r^{16} + L_в}, Ом, \quad (50)$$

$$R_з = 0,384 \cdot \frac{0,009}{\sqrt{130 \cdot 48}} + \frac{0,009}{2528 + 320} = 4,685 \cdot 10^{-5} Ом.$$

«Общее сопротивление сложного заземлителя спроектированного контура заземления ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС удовлетворяет условиям проверки» [8]:

$$R_з = 4,685 \cdot 10^{-5} Ом \le R_{з.доп.} = 2,931 Ом.$$

«Напряжение прикосновения в спроектированном контуре заземления ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС» [10]:

$$U_{пр} = K_п \cdot R_з \cdot I_з, В. \quad (51)$$

$$U_{пр} = 0,105 \cdot 4,658 \cdot 10^{-5} \cdot 1,3 = 6,358 \cdot 10^{-3} В.$$

Таким образом расчётным путём установлено, что в контуре заземления ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС необходимо применить 64 вертикальных электрода.

Процесс выполнения заземляющего контура включает установку заземляющих электродов, которые располагаются в грунте с учётом его сопротивления и геологических особенностей участка. Для достижения необходимого сопротивления заземления важно учитывать местные условия, такие как влажность, состав почвы и климатические факторы, которые могут повлиять на эффективность работы заземляющей системы.

Монтаж контура заземления также предполагает соединение всех металлических конструкций и оборудования ОРУ-110 кВ с заземляющей системой, что обеспечивает их защиту от перенапряжений и выравнивание потенциалов. Надёжные соединения и правильное распределение токов в грунте гарантируют безопасность эксплуатации станции, предотвращая возникновение опасных напряжений на поверхности земли и обеспечивая защиту оборудования.

Правильное выполнение и монтаж контура заземления являются ключевыми факторами, способствующими долгосрочной стабильности и безопасности работы ОРУ-110 кВ, снижая риски аварийных ситуаций и обеспечивая защиту как оборудования, так и обслуживающего персонала.

Конструктивное выполнение контура заземления и молниезащиты ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС представлено в графической части работы.

Выводы по разделу 3.

Установлено, что для безопасного и надёжного функционирования ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, необходимо и достаточно использовать:

- систему молниезащиты, состоящую из четырёх вертикальных молниеотводов высотой 24 м каждый:
- контур заземления, состоящий из 64 вертикальных заземлителей и выполненный в форме «замкнутой сетки».

Заключение

В работе разработан и предложен проект реконструкции электрической части распределительного устройства 110 кВ Таврической ТЭС, обусловленной вводом двух новых отходящих линий 110 кВ к потребителям в связи с увеличением нагрузки потребителей и расширением питающей сети региона.

Приведена исходная техническая характеристика Таврической ТЭС с последующей разработкой и теоретическим обоснованием мероприятий по реконструкции ОРУ-110 кВ данной электростанции.

Установлено, схема электрических соединений «две рабочие и обходная система шин» на ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС представляет собой оптимальное решение, сочетающее в себе высокую степень надежности, гибкость эксплуатации и возможность выполнения ремонтных и профилактических работ без отключения потребителей. Следовательно, в замене данный тип схемы на объекте не нуждается.

Также определено, что в ОРУ-110 кВ установлено новое современное оборудование, которое не нуждается в модернизации.

Показано, что потребители ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС получают питание по семи линиям электропередачи напряжением 110 кВ.

Кроме того, в рамках расширения производственных мощностей региона, а также увеличением нагрузки потребителей и необходимостью дополнительных связей с энергосистемой, в 2025 году планируется сооружение и ввод в эксплуатацию двух новых линий 110 кВ.

Данный факт обуславливает реконструкцию схемы электрических соединений ОРУ-110 кВ, так как требует двух новых присоединений в рамках данных изменений схемы.

Таким образом установлено, что актуальность данной работы обусловлена практической реконструкцией схемы электрических соединений ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, что обусловлено сооружением и вводом в

эксплуатацию двух новых воздушных линий 110 кВ вследствие увеличения нагрузки потребителей и необходимостью дополнительных связей с энергосистемой.

Для решения поставленной задачи, приведены технические данные максимальных активных нагрузок потребителей ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, с учётом двух новых линий 110 кВ перспективной нагрузки, которые принимаются за основу для проведения дальнейших расчётов.

Проведено техническое обоснование мероприятий по реконструкции силовой части ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, в результате чего обоснованы и подтверждены основные решения по выбору и проверке основного оборудования на новых линиях 110 кВ, отходящих к потребителям, а также проверено на соответствие расчётным параметрам сети оборудование объекта исследования.

В результате расчёта электрических нагрузок, определены значения нагрузок отдельных потребителей отходящих линий ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС.

Расчётным путём установлено, что суммарные расчётные нагрузки ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, определённые с учётом одновременности максимума нагрузки, будут равны:

- суммарная активная нагрузка – 156,8 МВт;
- суммарная реактивная нагрузка – 112,8 Мвар;
- суммарная полная нагрузка – 193,2 МВА;
- суммарный расчётный ток нормального режима – 1014 А.

Расчётным путём установлено, что силовые трансформаторы марки ТДЦ-125000/110 и ТДЦ-250000/110, питающие ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к их системе охлаждения по нагрузочной способности, что подтверждает их пригодность для питания ОРУ-110 кВ с учётом подключения и ввода в эксплуатацию двух линий для питания перспективной нагрузки потребителей 110 кВ на объекте исследования.

В результате проведения расчётов, были выбраны и проверены сечения проводников марки АС-120/19 с допустимым током $I_{доп}$ = 330 А для питания новых ВЛ-110 кВ «Таврическая ТЭС – Денисовка» и «Таврическая ТЭС – Строгоновка» от ОРУ-110 кВ. Также подтверждены проводники на семи существующих линиях 110 кВ, отходящих к потребителям.

Получены следующие основные результаты расчёта токов короткого замыкания на шинах ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС в максимальном режиме работы станции:

- максимальный ток трёхфазного короткого замыкания равен 4,54 кА;
- ударный ток трёхфазного короткого замыкания равен 10,59 кА;
- максимальное мгновенное действующее значение тока короткого замыкания составляет 6,17 кА;
- максимальное значение мощности короткого замыкания равно 904,3 МВА.

В работе были выбраны электрические аппараты для обеспечения защиты и коммутации двух новых воздушных линий для питания перспективной нагрузки.

Также проведена проверка электрических аппаратов, установленных ранее для защиты и коммутации семи существующих линий 110 кВ и вводных присоединений ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС.

Расчётным путём установлено, что в ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС подтверждено применение новейших аппаратов производства ЗАО «ЗЭТО» г. Великие Луки, необходимых для обеспечения защиты и коммутации электрических цепей объекта исследования, следующих марок:

- выключатели ВГТ-110.III-ОП-40/2000 У1 элегазовые колонковые однополюсные на напряжение 110 кВ, номинальный ток 2000 А, ток отключения 40 кА;
- разъединители РГН.2-110.II/2000-50 УХЛ1 двухколонковые горизонтально-поворотные на напряжение 110 кВ, номинальный ток 2000 А, с двумя комплектами заземляющих ножей;

– разъединители РГН.2-СК-110.II/2000-50 УХЛ1 двухколонковые горизонтально-поворотные ступенчато-килевой установки на напряжение 110 кВ, номинальный ток 2000 А, с двумя комплектами заземляющих ножей;
– разъединители РГН.1-110.II/2000-50 УХЛ1 двухколонковые горизонтально-поворотные на напряжение 110 кВ, номинальный ток 2000 А, с одним комплектом заземляющих ножей (РГ1а- 12 комплектов, РГ1б- 12 комплектов);
– разъединители РГН.1-СК-110.II/2000-50 УХЛ1 двухколонковые горизонтально-поворотные ступенчато-килевой установки на напряжение 110 кВ, номинальный ток 2000 А, с одним комплектом заземляющих ножей (РГ1а- 4 комплекта, РГ1б- 7 комплектов);
– ограничители перенапряжений ОПН-П1-110/77/10/3 III УХЛ1 нелинейные однофазные с регистратором срабатывания, изолирующей подставкой, на напряжение 110 кВ, с опорной конструкцией, в составе блока РОТн и/или ОТн;
– трансформаторы напряжения ЗНОГ-110.III У1 измерительные однофазные (четырехобмоточные и трехобмоточные) на напряжение 110 кВ, с опорной конструкцией;
– трансформаторы тока ТОГФ-110-II-0,2S/5P-1600-800-400/1измерительные однофазные (четырехобмоточные) на напряжение 110 кВ, с опорной конструкцией, в составе блока ТтВТт.

Для учета электроэнергии в ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС предусмотрена система коммерческого учета электрической энергии (АИИС КУЭ) с применением современных микропроцессорных счётчиков типа Альфа A1802RAL-P4GB-DW-4, производимых фирмой ООО «Эльстер Метроника».

Для защит линий 110 кВ, включая новые линии перспективной нагрузки, предполагается использование терминалов серии БЭ, на базе которых формируются типовые шкафы защит типа ШЭ ООО НПО «ЭКРА», имеющие экспертные заключения на соответствие функциональных и технических

показателей оборудования условиям эксплуатации и действующим отраслевым требованиям.

С учётом этого, для защиты линий 110 кВ ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС выбраны современные отечественные «шкафы защит линий электропередач 110-750 кВ ШЭ2607 и ШЭ2710».

Для управления, измерений, сигнализации, регистрации электрической части на Таврической ТЭС, в том числе в ОРУ-110 кВ, рекомендована к использованию компьютерная автоматизированная система управления и мониторинга АСУТП с автоматизированными рабочими местами и базовым сервером, реализуемая на средствах ТПТС-НТ (производитель – ФГУП «ВНИИ автоматики им. Н.Л. Духова», г. Москва).

Установлено, что для безопасного и надёжного функционирования ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС, необходимо и достаточно использовать:

- систему молниезащиты, состоящую из четырёх вертикальных молниеотводов высотой 24 м каждый:
- контур заземления, состоящий из 64 вертикальных заземлителей и выполненный в форме «замкнутой сетки».

Таким образом, в работе выбраны и обоснованы такие технические решения, которые в конечном итоге приведут к повышению параметров и показателей надёжности, бесперебойности, безопасности и экономичности схемы электрических соединений и оборудования ОРУ-110 кВ Таврической ТЭС.

Список используемых источников

1. Альфа A1802RAL-P4GB-DW-4. Счетчик электроэнергии трехфазный многофункциональный микропроцессорный [Электронный ресурс]: URL: https://alfa.nt-rt.ru/price/product/267189 (дата обращения: 20.09.2024).
2. Выбор блочных трансформаторов и трансформаторов связи [Электронный ресурс]: URL: https://vuzlit.com/744067/vybor_blochnyh_transformatorov_transformatorov_svyazi (дата обращения: 20.09.2024).
3. ГОСТ Р 59279-2020 «Схемы принципиальные электрические распределительных устройств от 35 до 750 кВ подстанций». [Электронный ресурс]: URL: https://docs.cntd.ru/document/1200177281 (дата обращения: 20.09.2024).
4. Допустимые длительные токовые нагрузки на неизолированные провода [Электронный ресурс]: URL: http://electro.narod.ru/tables/4.1.9.htm (дата обращения: 20.09.2024).
5. Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов. М.: Академия, 2021. 400 с.
6. Немировский А.Е. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций. М.: Инфра-Инженерия, 2020. 174 с.
7. Постановление Правительства РФ от 9 сентября 2023 г. № 1473 «Об утверждении комплексной государственной программы Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности» [Электронный ресурс]: URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/407532842/ (дата обращения: 20.09.2024).
8. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок (Приказ от 15 декабря 2020 г. № 903н / Приказ от 29 апреля 2022 г. № 279н). Изд-во Мини-Тайп, 2023. 216 с.

9. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Изд-во ДЕАН, 2022. 192 с.

10. Правила устройства электроустановок. 7-е издание. Изд-во ЦентрМаг, 2022. 584 с.

11. РД 153-34.0-20.527-98 «Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования» [Электронный ресурс]: URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294817/4294817179.htm (дата обращения: 20.09.2024).

12. Справочные данные по трансформаторам с высшим напряжением 110 кВ [Электронный ресурс]: URL: https://forca.com.ua/info/spravka/spravochnye-dannye-po-transformatoram-s-vysshim-napryazheniem-110-kv.html (дата обращения: 20.09.2024).

13. СТО 56947007-29.240.30.010-2008. «Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35-750 кВ. Типовые решения». [Электронный ресурс]: URL: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/56947007-29.240.30.010-2008.pdf (дата обращения: 20.09.2024).

14. СТО 56947007-29.240.30.047-2010. «Рекомендации по применению типовых принципиальных электрических схем распределительных устройств подстанций 35 - 750 кВ». [Электронный ресурс]: URL: https://docs.cntd.ru/document/1200088422/titles (дата обращения: 20.09.2024).

15. Таврическая ТЭС [Электронный ресурс]: URL: https://www.so-ups.ru/odu-south/odu-south-zone/objsouth/tavricheskaja-tehs/ (дата обращения: 20.09.2024).

16. Таврическая ТЭС. [Электронный ресурс]: URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Таврическая_ТЭС (дата обращения: 20.09.2024).

17. Устройство молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций: Сборник документов. Серия 17. Выпуск 27. Электронный ресурс]: URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294815/4294815349.pdf (дата обращения: 20.09.2024).

18. Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» № 261-ФЗ [Электронный ресурс]: URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/ (дата обращения: 20.09.2024).

19. Шкафы защит линий электропередач 110-750 кВ ШЭ2607, ШЭ2710 [Электронный ресурс]: URL: https://ekra.ru/product/rz-ps-110-750kv/zashchita-lin/she2607-she2710/ (дата обращения: 20.09.2024).

20. Элегазовое оборудование ЗАО «ЗЭТО» [Электронный ресурс]: URL: https://www.elec.ru/publications/elektricheskaja-generatsija/6993/ (дата обращения: 20.09.2024).