

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Электрические системы»

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО
УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

для студентов специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетиче-
ские системы и сети»

Составители: Короткевич М.А., Дашковский А.А.

Минск

БНТУ

2019

УДК 621.31(075.8)

Рецензенты:

Н.Е. Шевчик, В.М. Збродыга

Учебно-методический комплекс состоит из четырёх разделов: теоретический, практический, раздел контроля знаний и вспомогательный. Практический раздел содержит в себе девять работ, в которых затронуты вопросы расчёта и эксплуатации электрических сетей. Каждая работа практикума имеет описание, в котором имеется: цель, краткие теоретические сведения, порядок выполнения работы, содержание отчёта по работе, контрольные вопросы и список литературы. Кроме того, к каждой лабораторной работе разработана виртуальная модель в среде моделирования Matlab Simulink.

©Белорусский национальный
технический университет, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	4
ВЕДЕНИЕ.....	4
УСТРОЙСТВО ТРЁХФАЗНОЙ МОДЕЛИ-ТРЕНАЖЁРА	5
ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТ НА КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ 10 кВ	11
2. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	16
Лабораторная работа № 1	16
ИЗУЧЕНИЕ ТРЁХФАЗНОЙ МОДЕЛИ-ТРЕНАЖЁРА ГОРОДСКОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ.....	16
Лабораторная работа № 2	21
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ.....	21
Лабораторная работа № 3	27
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С НЕЙТРАЛЬЮ, ЗАЗЕМЛЁННОЙ ЧЕРЕЗ РЕЗИСТОР	27
Лабораторная работа № 4	33
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С КОМПЕНСИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ	33
Лабораторная работа № 5	39
ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ МЕСТ ДЕЛЕНИЯ ЗАМКНУТОЙ ГОРОДСКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ.....	39
Лабораторная работа № 6	43
ПЛАВКА ГОЛОЛЁДА НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ	43
Лабораторная работа № 7	52
ОЦЕНКА МЕРОПРИЯТИЙ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ.....	52
Лабораторная работа №8	62
ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ	62
Лабораторная работа № 9	69
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ПЕРЕВОЗБУЖДЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ	69
3. РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ	74
4. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ	75

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

ВВЕДЕНИЕ

Данный лабораторный комплекс содержит в себе девять работ, в которых затронуты вопросы расчёта и эксплуатации электрических сетей, такие как: исследование режимов работы электрической сети с различными способами заземления нейтрали, определение рациональных мест размыкания замкнутой электрической сети, способы плавки гололёда на воздушных линиях электропередачи, влияние мероприятий по повышению пропускной способности, технические мероприятия по обеспечению безопасности работ в электрических сетях, условия перевозбуждения трансформаторов. Каждая работа практикума имеет описание, в котором имеется: цель, краткие теоретические сведения, порядок выполнения работы, содержание отчёта по работе, контрольные вопросы и список литературы. Кроме того, к каждой лабораторной работе разработана виртуальная модель в среде моделирования Matlab Simulink.

Применение электронного учебно-методического комплекса позволит повысить степень наглядности проведения экспериментов, а также освоить технику визуально-ориентированного блочного моделирования на основе базовой системы Matlab.

В основу комплекса положены работы, разработанные доктором технических наук, профессором М.А. Короткевичем: работы №1-7 составлены на основе комплекса работ на трёхфазной модели-тренажёре городской кабельной электрической сети и учебного пособия к лабораторным работам по дисциплинам «Эксплуатация электрических сетей» и «Монтаж и модернизация электрических сетей». Работы №8 и №9 взяты из лабораторных практикумов по дисциплинам «Основы эксплуатации энергосистем» и «Основы эксплуатации электрических сетей» (Минск: БГПА, 1992). Инженером А.А. Дашковским разработаны виртуальные модели схем для проведения лабораторных работ на персональном компьютере.

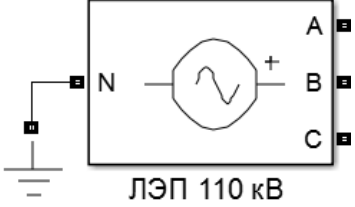
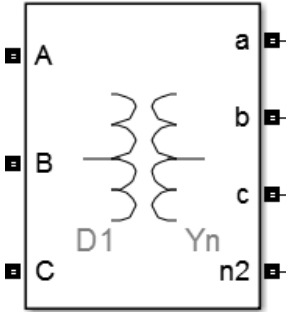
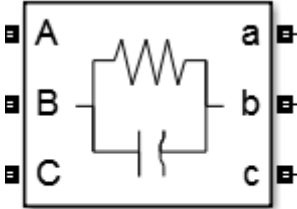
УСТРОЙСТВО ТРЁХФАЗНОЙ МОДЕЛИ-ТРЕНАЖЁРА

Виртуальная трёхфазная модель-тренажёр городской кабельной электрической сети представляет собой модель сети, созданную в среде Matlab Simulink. Она предназначена для изучения нормальных и переходных режимов электрической сети при изолированной, компенсированной (с помощью дугогасящих катушек) и заземлённой (через большое активное или индуктивное сопротивление) нейтралей. Для каждого вида рабочего заземления нейтрали в нормальном, аварийном и послеаварийном режимах имеется возможность зафиксировать параметры электрического режима (фазные и междуфазные значения напряжения, ток замыкания на землю и мощность, протекающие в нейтрали). Модель позволяет проводить исследования несимметричных режимов сети с определением симметричных составляющих (прямой, обратной и нулевой последовательности) напряжений и токов при различных видах несимметрии, а также исследование параметров несинусоидальности формы кривой напряжения и тока. Модель позволяет решать задачу выбора рациональных точек деления электрической сети с целью снижения потерь активной мощности при передаче электроэнергии.

Исследуемая электрическая сеть моделируется в трёхфазном исполнении. Линии электрической сети РЛ 1 – РЛ 3; РЛ 9; РЛ 10; ПЛ 1 – ПЛ 2 напряжением 10 кВ представлены в модели Г-образной схемой замещения (активные сопротивления и емкостные проводимости), линии РЛ 4 – РЛ 8 – емкостными проводимостями, силовые трансформаторы – своими физическими аналогами, нагрузки имеют активно-индуктивный характер.

Виртуальная модель состоит из следующих элементов представленных в таблице 1:

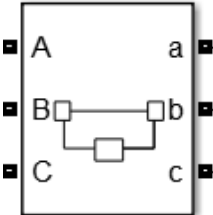
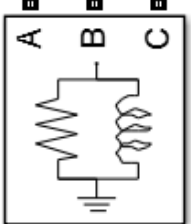
Таблица 1 - Элементы виртуальной модели

Наименование элемента	Пиктограмма
1	2
Система бесконечной мощности	 <p>ЛЭП 110 кВ</p>
Трансформатор	 <p>ТМ 2500 110/10</p>
Линия электропередачи	 <p>120 2.88</p>

Продолжение таблицы 1

1	2
Режимы работы нейтрали	
Измерительный блок	<p style="text-align: center;">И1</p>
Точка короткого замыкания	<p style="text-align: center;">Rп1</p>

Продолжение таблицы 1

1	2
Выключатель	
Нагрузка	<p data-bbox="532 582 632 614">0,4 кВ</p> 

где R_{50} , R_{100} – сопротивления заземления соответственно 50 Ом и 100 Ом;

L – дугогасящий реактор;

$Н1$ – измерительный блок, в котором фиксируются значения тока и реактивной мощности в нейтрали;

$И1$ – измерительный блок, в котором можно наблюдать значения фазного напряжения, междуфазного напряжения, значения активной и реактивной мощности в линии, а также следить за амплитудой фазного напряжения по осциллографу.

Схема моделируемого района электрической сети представлена на рисунке 1.1.

На схеме представлены два центра питания (ЦП 1 и ЦП 2) с трансформаторами мощностью 2500 кВ·А, высшее и низшее напряжение которых 110 кВ и 10 кВ соответственно.

От одной секции шин центра питания №1 отходит пять линий напряжением 10 кВ. Из этого числа – четыре распределительных линий 10 кВ и одна питающая линия ПЛ 1.

От центра питания №2 отходят линии напряжением 10 кВ, две из которых (ПЛ 2, РЛ 10) постоянно находятся под напряжением и обеспечивают резервирование шин РП 1 (секция С 1) и потребителей, питающихся от РЛ 1; к третьей линии (РЛ 9) подключена нагрузка двух ТП (ТП 9 и ТП 14).

Распределительный пункт №1 получает питание от центров питания №1 и №2 по питающим линиям напряжением 10 кВ (ПЛ 1 и ПЛ2). К секции С 1 шин РП 1 подключен силовой трансформатор мощностью 250 кВ·А.

Суммарная протяжённость распределительных и питающих линий 10 кВ, представленных в модели, равна 32,41 км.

Суммарное количество трансформаторных подстанций городской сети – 7. Количество распределительных пунктов – 1.

Режимы нейтрали сети: изолированная, компенсированная (включение в нейтраль трансформаторов центров питания дугогасящих реакторов), рассредоточенное заземление нейтрали (соединение нейтрали обмотки высшего напряжения отдельных трансформаторных подстанций в звезду с нулём и её заземление), комбинированное заземление нейтрали (присоединение к земле в центре питания наглухо или через малое активное сопротивление нейтрали заземляющих трансформаторов или искусственных нейтральных точек и нейтралей обмоток высшего напряжения части трансформаторных подстанций), заземление трансформаторов центра питания через большое активное сопротивление.

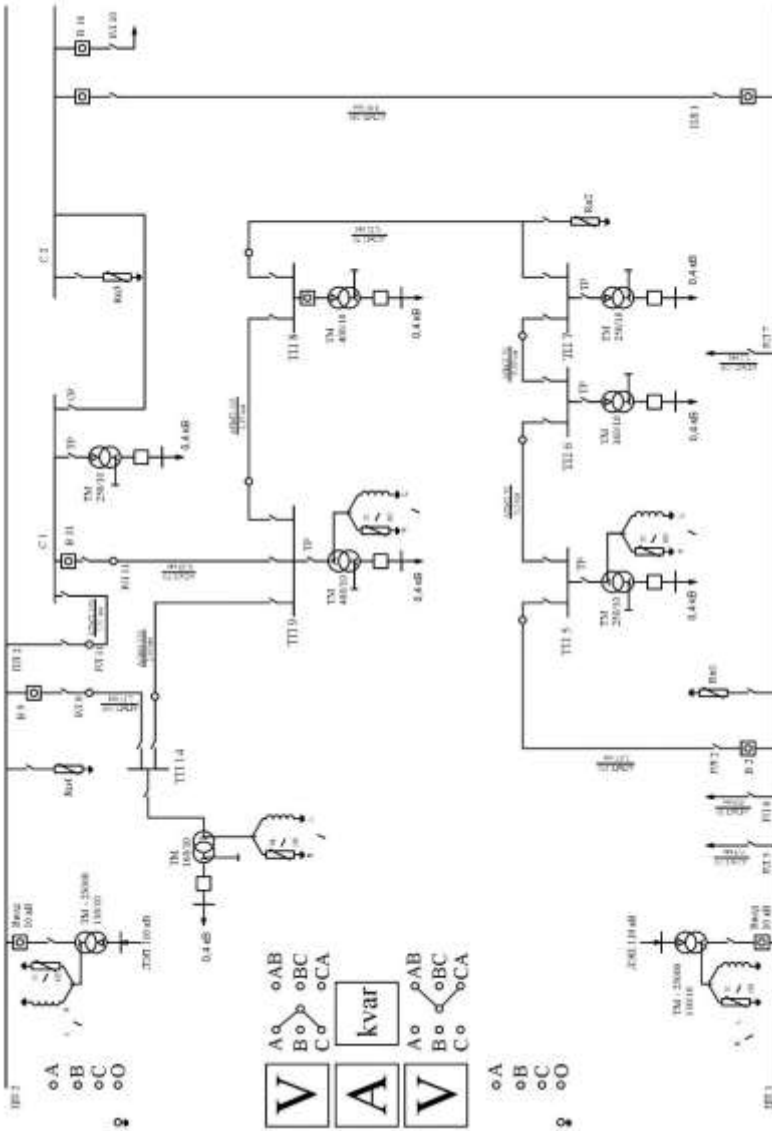


Рисунок 1 – Схема трёхфазной модели-тренажёра городской кабельной электрической сети

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТ НА КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ 10 кВ

Проведение работ на кабельных линиях при монтаже и эксплуатации связано с повышенной опасностью травматизма. Поэтому перед началом проведения работ должен быть выполнен комплекс организационных и технических мероприятий.

К организационным мероприятиям относятся: оформление работ нарядом по технике безопасности, оформление допуска к работе, надзор во время производства работы, оформление окончания работы.

Техническими мероприятиями являются: отключение линии, проверка отсутствия напряжения в кабелях, наложение заземления на месте производства работ, ограждение места производства работ и вывешивание разрешающих работу плакатов.

Перед началом раскопок должно быть проведено контрольное определение глубины залегания кабельной линии шурфовкой. Применение землеройных машин, отбойных молотков, ломов и кирок для рыхления грунта над кабелем допускается производить на глубину, при которой до кабеля остается слой грунта не менее 30 см. Остальной слой грунта должен удаляться вручную лопатами. В зимнее время к выемке грунта лопатами можно приступать только после его отогревания. При этом приближение источника тепла к кабелям допускается не ближе чем на 15 см. При рытье траншей в слабом или влажном грунте, когда есть угроза обвала, их стены должны быть надёжно укреплены. В сыпучих грунтах работы можно вести без крепления стен, но с устройством откосов, соответствующих углу естественного откоса грунта. Грунт, извлеченный из котлована или траншеи, следует размещать на расстоянии не менее 0,5 м от бровки выемки. Разработка и крепление грунта в выемках глубиной более 2 м должны производиться по плану производства работ. В грунтах естественной влажности при отсутствии грунтовых вод и при отсутствии расположенных поблизости подземных сооружений рытье котлованов и траншей с вертикальными стенками без крепления разрешается на глубину не более: 1 м – в насыпных, песчаных и крупнообломочных грунтах; 1,25 м – в супесях; 1,5 м – в суглинках и глинах. В грунтах естественной влажности при отсутствии грунтовых

вод и при отсутствии расположенных поблизости подземных сооружений рытьё котлованов и траншей с вертикальными стенками без крепления разрешается на глубину не более: 1 м – в насыпных, песчаных и крупнообломочных грунтах; 1,25 м – в супесях; 1,5 м – в суглинках и глинах.

Перед проведением ремонтных работ следует определить нужную кабель. Если кабель проложен открыто, то участок, подлежащий ремонту, определяют путём визуального прослеживания, сверкой с чертежами или по биркам. Если кабель проложен в земле, то необходимо прорыть шурф и сверить кабель с чертежами прокладки. Если отсутствует видимое повреждение кабеля, то применяют метод накладной рамки, когда к жиле подключается генератор звуковой частоты и на обнаруженную в шурфу оболочку кабеля накладывается накладная рамка с присоединенным к ней головным телефоном, при вращении рамки вокруг оси кабеля прослушиванием определяется характер изменения звука от электромагнитного поля, до места повреждения будет прослушиваться два максимума и два минимума звучания, а после места повреждения будет монотонный звук.

Перед разрезанием кабель должен быть отключен и заземлен со всех сторон, откуда может быть подано напряжение. Рабочие на месте должны убедиться в отсутствии напряжения при помощи специального устройства, состоящего из изолирующей штанги и стальной иглы или режущего наконечника. В туннелях, коллекторах, колодцах и других кабельных сооружениях допускается применять приспособление для прокола кабеля при наличии дистанционного управления им. Устройство для прокола кабеля должно обеспечить прокол или разрезание брони и оболочки кабеля до жил с замыканием их между собой и заземлением. Кабель у места прокалывания предварительно должен быть закрыт экраном. Металлическую часть приспособления для прокалывания заземляют. Для заземления устройства для прокола кабеля могут быть использованы заземлитель, погруженный в грунт на глубину не менее 0,5 м, или броня кабеля. Присоединять заземляющий проводник к броне кабеля следует посредством хомутов, под которыми броня должна быть зачищена. В тех случаях, когда броня подверглась коррозии, допускается присоединение заземляющего проводника к металлической оболочке кабеля. Если в результате повреждения кабеля открыты все токоведущие жилы, до-

пускается проверять отсутствие напряжения непосредственно указателем напряжения без прокола кабеля. При проколе кабеля рабочие должны пользоваться спецодеждой, диэлектрическими перчатками и средствами защиты лица и глаз, при этом рабочим необходимо стоять на изолирующем основании сверху траншеи на максимальном расстоянии от прокалываемого кабеля. Прокол кабеля должны выполнять двое рабочих: допускающий и производитель работ, один из них прокалывает кабель, а второй наблюдает. На кабельных линиях электростанций и подстанций, где длина и способ прокладки кабелей позволяют, пользуясь чертежами, бирками, кабелеискательным аппаратом, точно определить подлежащий ремонту кабель, допускается, по усмотрению выдающего наряд, не прокалывать кабель перед его разрезанием или вскрытием муфты. Вскрывать соединительные муфты и разрезать кабель в тех случаях, когда предварительный прокол не делается, следует заземлённым инструментом, надев диэлектрические перчатки, используя средства защиты лица и глаз, стоя на изолирующем основании.

Выполнение огневых работ должно проводиться в соответствии с правилами пожарной безопасности, выполнять такие работы должны лица, имеющие право на выполнение огневых работ с применением средств индивидуальной защиты. Запрещается использовать для подвешивания кабелей рядом расположенные кабели, трубопроводы и тому подобное. Подвешивать кабели следует таким образом, чтобы не происходило их смещение.

Открытые кабели и кабельные муфты, должны укрепляться на доске, подвешенной с помощью проволоки или троса к перекинутым через траншею брусам, и закрываться коробами. Одна из стенок короба должна быть съёмной и закрепляться без применения гвоздей.

При перекатке барабана с кабелем необходимо принять меры против захвата его выступами частей одежды. До начала работ по перекатке барабана с кабелем необходимо закрепить концы кабеля. Допускается перекачивать барабан с кабелем только на горизонтальной поверхности, по твёрдому грунту или прочному настилу. Размещать кабели, пустые барабаны, механические приспособления, устройства и инструменты следует вне призмы обрушения грунта и не ближе одного метра от края траншеи. Не допускается при прокладке кабеля стоять внутри углов поворота, а также поддерживать кабель вручную на поворотах трассы. Для этого должны быть установлены угловые

ролики. Запрещается применять трансформаторы напряжением выше 380 В для прогрева кабелей электрическим током перед выполнением работ по их прокладке. Перекладывать, сдвигать, перемещать кабели можно после их отключения и заземления. Кабели, находящиеся под напряжением, допускается перемещать на расстояние до 5...7 м при следующих условиях:

а) работа выполняется по наряду квалифицированными рабочими;

б) температура кабеля не ниже +5°C;

в) кабели около муфт для исключения изгиба закреплены на досках;

г) поверх диэлектрических перчаток для защиты их от механических повреждений надевают брезентовые рукавицы.

При прокладке кабеля с передвигающегося транспортёра, кабелеукладчика, со специально оборудованной машины или трубоукладчика принимать и укладывать кабель должны не менее двух рабочих. При ручной прокладке кабеля число рабочих должно быть таким, чтобы соблюдались нормы подъёма, а также все рабочие должны находиться по одну сторону кабеля. Необходимо работать в средствах индивидуальной защиты рук. Запрещается подъём, крепление и рихтовка кабеля массой более 1 кг на 1 м длины с приставных лестниц и лестниц-стремянков.

Работу в подземных кабельных сооружениях, в которых возможно появление вредных и взрывоопасных веществ, а также осмотр со спуском в них, должны выполнять по наряду не менее 3 работников, из которых двое – страхующие. Производитель работ должен иметь группу по электробезопасности не ниже IV. Между работниками, выполняющими работу, и страхующими должна быть установлена связь. Перед началом работы им необходимо убедиться в отсутствии горячих и вредных для дыхания газов в этих сооружениях. Категорически запрещается проверять отсутствие газов при помощи открытого огня (забрасыванием горящих спичек, пакли). Это может вызвать пожар. Для проверки применяют специальный газоанализатор или рудничную лампу. Убедившись в отсутствии горючих газов, на дно колодца опускают зажжённую свечу. Если свеча гаснет, то это свидетельствует о том, что в колодце есть углекислый газ. При обнаружении газа в колодец нагнетают чистый воздух при помощи установленного снаружи ручного или электрического вентилятора, конец

рукава которого должен быть на расстоянии 25 см от дна. Осмотр подземных сооружений, не относящихся к числу, в которых возможно появление вредных и взрывоопасных веществ, и работы в них по уборке сооружений, окраске кабелей, ремонту строительной части и тому подобные должны проводить не менее двух рабочих. На электростанциях и подстанциях осматривать коллекторы и туннели может один рабочих. При прожигании мест повреждений кабелей находиться в колодцах запрещается, а в туннелях и коллекторах допускается только на участке между двумя открытыми входами. Запрещается работать на кабелях во время их прожигания. После прожигания для предотвращения горения кабели должны быть осмотрены. Перед допуском к работам и проведением осмотра в туннелях устройства защиты от пожара в них должны быть переведены с автоматического действия на дистанционное управление и на ключе управления должен быть вывешен плакат безопасности. Для освещения рабочих мест в колодцах и туннелях должны применяться светильники напряжением 12 В или аккумуляторные фонари во взрывозащищённом исполнении. Трансформатор для светильников напряжением 12 В должен располагаться вне колодца или туннеля.

2. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ИЗУЧЕНИЕ ТРЁХФАЗНОЙ МОДЕЛИ-ТРЕНАЖЁРА ГОРОДСКОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Цель работы: Изучить конструкцию, возможности, принцип действия и методику проведения экспериментов на трёхфазной модели-тренажёре городской кабельной электрической сети.

Краткие теоретические сведения

Трёхфазная модель тренажёр представляет собой схему в среде Matlab Simulink, которая имеет схемную, коммутационную и измерительную часть.

Схемная часть включает в себя центры питания, трансформаторы, линии электропередачи, нагрузки.

Коммутационная часть позволяет производить переключения вводов центров питания, распределительных линий, питающих линий, трансформаторных подстанций, а также переключение режимов нейтралей на трансформаторных подстанциях. К коммутационной части ещё относятся точки создающие короткое замыкание Rп1 – Rп4. Переключение производится следующим образом: двойным кликом по коммутационному устройству открывается его диалоговое окно, в котором в строке «Initial status» выбирается положение «closed» отключено или «open» включено. Переключение режима нейтрали и включение режима короткого замыкания производится в следующем порядке: открывается диалоговое окно устройства, в строке «Initial status» вписывается значения 0 или 1, которые соответствуют положениям выключателя отключено и включено соответственно.

Параметры линий электропередачи задаются активным сопротивлением (Ом) и ёмкостью (Ф). Для изменения параметров линии электропередачи необходимо двойным щелчком левой кнопки мыши нажать на соответствующую пиктограмму. В появившемся диалоговом окне в строке «Resistance R (Ohms)» ввести нужное значение активного сопротивления, а в строке «Capacitance C (F)» - ёмкости. После ввода числа необходимо нажать кнопку «ОК».

Измерительная часть находится в блоках измерения: И1 – И9, Н1, Н2, Н5, Н9, Н14. В блоках И1 – И9 производятся измерения в линиях электропередачи фазных и междуфазных значений напряжения, значения тока, потоков мощности в сети, а также имеется осциллограф, показывающий изменение фазного напряжения за определённое время. В блоках Н1, Н2, Н5, Н9, Н14 фиксируются значения тока и мощности, протекающих в нейтрали.

Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучить данную инструкцию.
2. Запустить файл Scheme1.mdl в программе Matlab Simulink, найти расположение всех описываемых элементов и уяснить их назначение.
3. Выяснить положение коммутационных устройств: включено, отключено.
4. Вычертить и собрать схему сети согласно заданию или согласно варианту, указанному преподавателем.

Рассмотрим следующие несколько вариантов схем сети:

- 1) питание подаётся от ЦП 1;
- 2) питание подаётся от ЦП 2;
- 3) питание подаётся от ЦП 1 через ПЛ 1.
5. С помощью коммутационных аппаратов на модели собрать схему сети с изолированной нейтралью для указанного преподавателем варианта.

Рассмотрим указанные три варианта схемы сети.

Вариант №1

1. Переключатели положения нейтральных точек трансформаторов центров питания К 1 и К 2 установить в положение отключено; переключатели положения нейтральных точек трансформаторов ТП 5, ТП 9, ТП 14 (К 5, К 9, К 14) установить в положение отключено.

2. Установить в положение включено ввод напряжением 10 кВ центра питания ЦП 1, включить линию РЛ 2 выключателем В 2, трансформаторы ТП 5 – ТП 7, ТП 9, ТП 14. Трансформатор ТП 8 может быть включен или выключен, в зависимости от указаний преподавателя (в рассматриваемом варианте он включен).

3. Запустить схему нажатием на панели кнопки «Run».

4. Произвести замеры тока и мощности в нейтрали, потоков мощности в сети, фазных и междуфазных напряжений и результаты занести в таблицу 1.2.

5. Имитировать замыкание одной фазы на землю, установив устройство Rp1 в положение включено, и зафиксировать значения фазных и междуфазных напряжений, тока и мощности в нейтрали, потоков мощности в сети и результаты занести в таблицу 1.1.

Вариант №2

1. Переключатели положения нейтральных точек трансформаторов центров питания К 1 и К 2 установить в положение отключено; переключатели положения нейтральных точек трансформаторов ТП 5, ТП 9, ТП 14 (К 5, К 9, К 14) установить в положение отключено.

2. Установить в положение включено ввод напряжением 10 кВ центра питания ЦП 2, включить линию РЛ 9 выключателем В 9, трансформаторы ТП 5 – ТП 7, ТП 9, ТП 14. Трансформатор ТП 8 может быть включен или выключен, в зависимости от указаний преподавателя (в рассматриваемом варианте он включен).

3. Запустить схему нажатием на панели кнопки «Run».

4. Произвести замеры тока и мощности в нейтрали, потоков мощности в сети, фазных и междуфазных напряжений и результаты занести в таблицу 1.2.

5. Имитировать замыкание одной фазы на землю, установив устройство Rp1 в положение включено, и зафиксировать значения фазных и междуфазных напряжений, тока и мощности в нейтрали, потоков мощности в сети и результаты занести в таблицу 1.1.

Вариант №3

1. Переключатели положения нейтральных точек трансформаторов центров питания К 1 и К 2 установить в положение отключено; переключатели положения нейтральных точек трансформаторов ТП 5, ТП 9, ТП 14 (К 5, К 9, К 14) установить в положение отключено.

2. Установить в положение включено ввод напряжением 10 кВ центра питания ЦП 1, включить линию РЛ 11 выключателем В 11, питающую линию ПЛ 1 выключателями В'п1 и В''п1, секционный разъединитель СР, соединяющий секции С 1 и С2, трансформаторы

ТП 5 – ТП 7, ТП 9, ТП 14. Трансформатор ТП 8 может быть включен или выключен, в зависимости от указаний преподавателя (в рассматриваемом варианте он включен).

3. Запустить схему нажатием на панели кнопки «Run».

4. Произвести замеры тока и мощности в нейтрали, потоков мощности в сети, фазных и междуфазных напряжений и результаты занести в таблицу 1.2.

5. Имитировать замыкание одной фазы на землю, установив устройство Rp1 в положение включено, и зафиксировать значения фазных и междуфазных напряжений, тока и мощности в нейтрали, потоков мощности в сети и результаты занести в таблицу 1.1.

Содержание отчёта

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения, содержащие устройство и назначение модели, её основные элементы.
3. Схема лабораторной установки.
4. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Какие виды заземления нейтрали в сети 6-35 кВ Вы знаете?
2. Как представлены на виртуальной модели линии, трансформаторы и нагрузки?
3. Каков порядок набора схем сети на виртуальной модели-тренажёре?
4. Каков порядок измерения напряжения, тока, мощности в установившихся и переходных режимах?

Таблица 1.1 – Результаты измерений

Номер опыта	Состояние коммутационной аппаратуры	I_0 , А	Q_0 , квар	U_A , кВ	U_B , кВ	U_C , кВ	U_{AB} , кВ	U_{BC} , кВ	U_{CA} , кВ
1.	Нормальный режим								
2.	Послеаварийный режим (включено Rп1)								

Литература

1. Идельчик, В.И. Электрические системы и сети / В.И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
2. Короткевич, М.А. Режимы нейтрали городской электрической сети / М.А. Короткевич, Д. Л. Жив. – Минск: БелНИИагроэнерго, 1997. – 68 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Цель работы: Исследование значений тока и перенапряжений при однофазном замыкании на землю в сетях с изолированной нейтралью.

Краткие теоретические сведения

Сооружение электрических сетей номинальным напряжением 6-35 кВ с изолированной нейтралью в своё время было обусловлено необходимостью обеспечения бесперебойности электроснабжения потребителей в условиях однофазного замыкания на землю, что вполне оправдывалось для нерезервированной воздушной сети. Здесь, при отсутствии заземляющей дуги, замыкания одной фазы линии на землю, доля которых составляет более 75% от общего числа повреждений, остаются незамеченными для большинства приёмников электроэнергии. В воздушных линиях значительно ниже, по сравнению с кабельными линиями, вероятность перерастания замыканий на землю в междуфазное короткое замыкание. Отсутствие источников электроэнергии (трансформаторов, генераторов) с заземлённой нейтралью уменьшает ток однофазного замыкания до уровня, обусловленного ёмкостной и активной проводимостями линий.

Различают сети с изолированной нейтралью и сети заземлённые через индуктивные сопротивления (сети с компенсированной нейтралью). Указанные сети напряжением 6-10 кВ характерны для Республики Беларусь и стран СНГ.

В настоящее время электроснабжение большинства городских потребителей 6-10 кВ осуществляется от разомкнутой резервированной кабельной сети. При этом устройства автоматического ввода резервного питания (АВР) применяются как на указанных напряжениях (на шинах центров питания и распределительных пунктов), а также для потребителей первой категории и части потребителей второй и третьей категории на напряжение 0,4 кВ.

При работе сети в условиях не отключённого однофазного замыкания в месте повреждения может образовываться заземляющая

дуга. Её горение сопровождается большими тепловыделениями и вызывает значительные перенапряжения на повреждённых фазах (до 3,9 Уф). Это приводит к снижению срока службы изоляции кабельной линии и вероятному перерастанию однофазного замыкания на них в междуфазное.

Для снижения тока однофазного замыкания на землю применяют резонансную настройку с помощью дугогасящего реактора (ДГР). При такой настройке ток замыкания на землю в месте замыкания приближается к нулю, что должно предотвращать повторные зажигания заземляющей дуги и связанные с этим перенапряжения.

Порядок выполнения работы

1. Изучить краткие теоретические сведения.
2. Вычертить схему сети согласно заданию или согласно варианту, указанному преподавателем.

Рассмотрим следующие несколько вариантов схем сети:

- 1) питание подаётся от ЦП 1;
- 2) питание подаётся от ЦП 2;
- 3) питание подаётся от ЦП 1 через ПЛ 1.
3. Запустить файл Scheme1.mdl в программе Matlab Simulink.
4. С помощью коммутационных аппаратов на модели собрать схему сети с изолированной нейтралью для указанного преподавателем варианта.

Рассмотрим указанные три варианта схемы сети.

Вариант №1

1. Переключатели положения нейтральных точек трансформаторов центров питания К 1 и К 2 установить в положение отключено; переключатели положения нейтральных точек трансформаторов ТП 5, ТП 9, ТП 14 (К 5, К 9, К 14) установить в положение отключено.

2. Установить в положение включено ввод напряжением 10 кВ центра питания ЦП 1, включить линию РЛ 2 выключателем В 2.

3. Включить устройство Rp1 замыкания на землю. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоках И1, U_ϕ , U_L в блоке И1 и результаты занести в таблицу 2.1.

4. Отключить Rp1 и включить Rp2. В этой точке последовательно производим измерения для трёх случаев: Rp2=15 Ом, Rp2=7

Ом и $R_{п2}=0$. Для этого в диалоговом окне устройства замыкания в строке «Fault resistance R_{on} (Ohm):» задаём указанные значения. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоках Н1, $U_{ф}$, $U_{л}$ в блоке И1 и результаты занести в таблицу 2.1.

5. Отключить $R_{п2}$ и включить $R_{п3}$. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоках Н1, $U_{ф}$, $U_{л}$ в блоке И1 и результаты занести в таблицу 2.1.

6. Отключить $R_{п3}$ и включить $R_{п4}$. В этой точке $R_{п4}=100$ Ом. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоках Н1, $U_{ф}$, $U_{л}$ в блоке И1 и результаты занести в таблицу 2.1.

7. Отключить $R_{п4}$. Включить РЛ 5, РЛ 6, РЛ 7. Включить нагрузку ТП-5, ТП-6, ТП-7, ТП-8, ТП-9. Включить $R_{п1}$. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоках Н1, $U_{ф}$, $U_{л}$ в блоке И1 и результаты занести в таблицу 2.1. В блоке И1 открыть осциллограф и проследить за амплитудой напряжения в момент замыкания.

Вариант №2

1. Переключатели положения нейтральных точек трансформаторов центров питания К 1 и К 2 установить в положение отключено; переключатели положения нейтральных точек трансформаторов ТП 5, ТП 9, ТП 14 (К 5, К 9, К 14) установить в положение отключено.

2. Установить в положение включено ввод напряжением 10 кВ центра питания ЦП 2, включить линию РЛ 9 выключателем В 9.

3. Включить устройство $R_{п1}$ замыкания на землю. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоках Н2, $U_{ф}$, $U_{л}$ в блоке И7 и результаты занести в таблицу 2.1.

4. Отключить $R_{п1}$ и включить $R_{п2}$. В этой точке последовательно производим измерения для трёх случаев: $R_{п2}=15$ Ом, $R_{п2}=7$ Ом и $R_{п2}=0$. Для этого в диалоговом окне устройства замыкания в строке «Fault resistance R_{on} (Ohm):» задаём указанные значения. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоках Н2, $U_{ф}$, $U_{л}$ в блоке И7 и результаты занести в таблицу 2.1.

5. Отключить $R_{п2}$ и включить $R_{п3}$. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоках Н2, $U_{ф}$, $U_{л}$ в блоке И7 и результаты занести в таблицу 2.1.

6. Отключить Рп3 и включить Рп4. В этой точке Рп4=100 Ом. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоках Н2, U_ϕ , U_L в блоке И7 и результаты занести в таблицу 2.1.

7. Отключить Рп4. Включить РЛ 5, РЛ 6, РЛ 7. Включить нагрузку ТП-5, ТП-6, ТП-7, ТП-8, ТП-9. Включить Рп1. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоках Н2, U_ϕ , U_L в блоке И7 и результаты занести в таблицу 2.1. В блоке И7 открыть осциллограф и проследить за амплитудой напряжения в момент замыкания.

Вариант №3

1. Переключатели положения нейтральных точек трансформаторов центров питания К 1 и К 2 установить в положение отключено; переключатели положения нейтральных точек трансформаторов ТП 5, ТП 9, ТП 14 (К 5, К 9, К 14) установить в положение отключено.

2. Установить в положение включено ввод напряжением 10 кВ центра питания ЦП 1, включить линию РЛ 11 выключателем В 11, питающую линию ПЛ 1 выключателями В'п1 и В''п1, секционный разъединитель СР, соединяющий секции С 1 и С2,

3. Включить устройство Рп1 замыкания на землю. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоках Н1, U_ϕ , U_L в блоке И9 и результаты занести в таблицу 2.1.

4. Отключить Рп1 и включить Рп2. В этой точке последовательно производим измерения для трёх случаев: Рп2=15 Ом, Рп2=7 Ом и Рп2=0,001 Ом. Для этого в диалоговом окне устройства замыкания в строке «Fault resistance Ron (Ohm):» задаём указанные значения. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоках Н1, U_ϕ , U_L в блоке И9 и результаты занести в таблицу 2.1.

5. Отключить Рп2 и включить Рп3. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоках Н1, U_ϕ , U_L в блоке И9 и результаты занести в таблицу 2.1.

6. Отключить Рп3 и включить Рп4. В этой точке Рп4=100 Ом. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоках Н1, U_ϕ , U_L в блоке И9 и результаты занести в таблицу 2.1.

7. Отключить Рп4. Включить РЛ 5, РЛ 6, РЛ 7. Включить нагрузку ТП-5, ТП-6, ТП-7, ТП-8, ТП-9. Включить Рп1. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоках Н1, U_ϕ , U_L в блоке И9 и

результаты занести в таблицу 2.1. В блоке И9 открыть осциллограф и проследить за амплитудой напряжения в момент замыкания.

Содержание отчёта

1. Цель работы и краткие теоретические сведения.
2. Схема лабораторной установки.
3. Результаты измерений.
4. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Каковы достоинства и недостатки режима изолированной нейтрали в сети 6-10 кВ?
2. Чем опасны большие токи замыкания на землю?
3. Чем опасны перенапряжения в сети при однофазном замыкания на землю?
4. Каковы уровни коммутационных перенапряжений в сетях с изолированной нейтралью?
5. Почему в сети с изолированной нейтралью нет возможности автоматического перехода потребителей на резервный источник питания при однофазном замыкании на землю?

Литература

1. Короткевич, М.А. Режимы нейтрали городской электрической сети / М.А. Короткевич, Д. Л. Жив. – Минск: БелНИИагро-энерго, 1997. – 68 с.
2. Сирота, И.М. Режимы работы нейтрали электрических сетей / И.М. Сирота, С.Н. Кисиленко, А.М. Михайлов. – Киев: Наукова думка, 1985. – 264 с.

Таблица 2.1 – Результаты измерений сети с изолированной нейтралью

Номер опыта	Операция	I_0 , А	Q_0 , квар	U_A , кВ	U_B , кВ	U_C , кВ	U_{AB} , кВ	U_{BC} , кВ	U_{CA} , кВ
1.	Включено Rп1								
2.	Отключено Rп1 Включено Rп2 Rп2=15 Ом Rп2=7 Ом Rп2=0,001 Ом								
3.	Отключено Rп2 Включено Rп3								
4.	Отключено Rп3 Включено Rп4								
5.	Отключено Rп4 Включено Rп1 Включены РЛ 5, РЛ 6, РЛ 7 Включена нагрузка ТП-5, ТП-6, ТП-7, ТП-8, ТП-9								

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С НЕЙТРАЛЬЮ, ЗАЗЕМЛЁННОЙ ЧЕРЕЗ РЕЗИСТОР

Цель работы: Исследование уровней перенапряжений при однофазном замыкании на землю в сети с нейтралью, заземлённой через резистор.

Краткие теоретические сведения

Избежать существенных недостатков работы сети в режимах изолированной или компенсированной нейтралей (длительное повышение напряжения на неповреждённых фазах, значительные перенапряжения при дуговых замыканиях, опасность поражения людей электрическим током, трудности с созданием простой и селективной релейной защиты, способной отключать повредившуюся линию и т.д.) возможно путём применения глухого заземления нейтрали или заземления нейтрали через резистор. Так как глухое заземление нейтрали или заземление через малое активное сопротивление (низкоомным считается резистор сопротивлением до 10 Ом) связано с существенным усложнением конструкций применяющихся в настоящее время резисторов и в ряде случаев требует значительных капитальных затрат или на модернизацию контуров заземления подстанций (с целью доведения значения сопротивления заземления до 0,5 Ом) или на модернизацию (замену) коммутационных аппаратов (выключателей) с соответствующими токами отключения, то в рассматриваемых условиях наименее капиталоемким мероприятием по повышению электробезопасности и надёжности работы сети может служить заземление нейтрали через высокоомный резистор, включаемый или в нейтраль обмотки напряжением 35 кВ силового трёхфазного трансформатора, или в нейтраль специального заземляющего трансформатора напряжением 10 кВ. При этом значение электрического сопротивления резистора должно выбираться исходя из необходимости гашения дуги в месте повреждения путём автоматического отключения однофазных замыканий при токе замыкания на землю, не превышающем 25 А, что не связано с необходимостью усиления имеющихся контуров заземления.

Включение резистора в изолированную нейтраль сети приводит к увеличению тока замыкания на землю и обуславливает необходимость применения релейной защиты в трёхфазном исполнении. С другой стороны, активное сопротивление нейтрали сети позволяет снизить кратность дуговых и исключить феррорезонансные перенапряжения, уменьшить число повторных зажиганий дуги и тем самым повысить надёжность работы сети, снизить уровень коммутационных перенапряжений, обеспечить более надёжную работу средств релейной защиты и, что самое главное, повысить уровень электробезопасности сети.

Однако для включения резисторов в нейтраль сети требуются дополнительные капитальные вложения на проектирование соответствующей ячейки на подстанции, приобретение резистора и его монтаж, организацию релейной защиты в трёхфазном исполнении при ежегодных расходах на обслуживание резистора (измерение сопротивления резистора и сопротивления его изоляции).

Порядок выполнения работы

1. Изучить краткие теоретические сведения.
2. Вычертить схему сети согласно заданию или согласно варианту, указанному преподавателем.

Рассмотрим следующие несколько вариантов схем сети:

- 1) питание подаётся от ЦП 1;
- 2) питание подаётся от ЦП 2;
- 3) питание подаётся от ЦП 1 через ПЛ 1.
3. Запустить файл Scheme1.mdl в программе Matlab Simulink.
4. С помощью коммутационных аппаратов на модели собрать схему сети с нейтралью заземлённой через резистор для указанного преподавателем варианта.

Рассмотрим указанные три варианта схемы сети.

Вариант №1

1. При помощи переключателей положения нейтральных точек трансформаторов центров питания К 1 и К 2 включить сопротивление 100 Ом в нейтрали; переключателями положения нейтральных точек трансформаторов ТП 5, ТП 9, ТП 14 (К 5, К 9, К 14) включить сопротивление 100 Ом в нейтрали.

2. Установить в положение включено ввод напряжением 10 кВ центра питания ЦП 1, включить линию РЛ 2 выключателем В 2.

3. Включить устройство Рп1 замыкания на землю. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоке Н1, U_ϕ , U_L в блоке И1 и результаты занести в таблицу 3.1.

4. Отключить Рп1 и включить Рп2. В этой точке последовательно производим измерения для трёх случаев: $R_{п2}=15$ Ом, $R_{п2}=7$ Ом и $R_{п2}=0$. Для этого в диалоговом окне устройства замыкания в строке «Fault resistance R_{on} (Ohm):» задаём указанные значения. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоке Н1, U_ϕ , U_L в блоке И1 и результаты занести в таблицу 3.1.

5. Отключить Рп2 и включить Рп3. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоке Н1, U_ϕ , U_L в блоке И1 и результаты занести в таблицу 3.1.

6. Отключить Рп3 и включить Рп4. В этой точке $R_{п4}=100$ Ом. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоке Н1, U_ϕ , U_L в блоке И1 и результаты занести в таблицу 3.1.

7. Отключить Рп4. Включить РЛ 5, РЛ 6, РЛ 7. Включить нагрузку ТП-5, ТП-6, ТП-7, ТП-8, ТП-9. Включить Рп1. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоке Н1, U_ϕ , U_L в блоке И1 и результаты занести в таблицу 3.1. В блоке И1 открыть осциллограф и проследить за амплитудой напряжения в момент замыкания.

Вариант №2

1. При помощи переключателей положения нейтральных точек трансформаторов центров питания К 1 и К 2 включить сопротивление 100 Ом в нейтрали; переключателями положения нейтральных точек трансформаторов ТП 5, ТП 9, ТП 14 (К 5, К 9, К 14) включить сопротивление 100 Ом в нейтрали.

2. Установить в положение включено ввод напряжением 10 кВ центра питания ЦП 2, включить линию РЛ 9 выключателем В 9.

3. Включить устройство Рп1 замыкания на землю. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоке Н2, U_ϕ , U_L в блоке И7 и результаты занести в таблицу 3.1.

4. Отключить Рп1 и включить Рп2. В этой точке последовательно производим измерения для трёх случаев: $R_{п2}=15$ Ом, $R_{п2}=7$ Ом и $R_{п2}=0$. Для этого в диалоговом окне устройства замыкания в

строке «Fault resistance Ron (Ohm):» задаём указанные значения. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоке Н2, U_ϕ , U_L в блоке И7 и результаты занести в таблицу 3.1.

5. Отключить Rп2 и включить Rп3. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоке Н2, U_ϕ , U_L в блоке И7 и результаты занести в таблицу 3.1.

6. Отключить Rп3 и включить Rп4. В этой точке Rп4=100 Ом. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоке Н2, U_ϕ , U_L в блоке И7 и результаты занести в таблицу 3.1.

7. Отключить Rп4. Включить РЛ 5, РЛ 6, РЛ 7. Включить нагрузку ТП-5, ТП-6, ТП-7, ТП-8, ТП-9. Включить Rп1. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоке Н2, U_ϕ , U_L в блоке И7 и результаты занести в таблицу 3.1. В блоке И7 открыть осциллограф и проследить за амплитудой напряжения в момент замыкания.

Вариант №3

1. При помощи переключателей положения нейтральных точек трансформаторов центров питания К 1 и К 2 включить сопротивление 100 Ом в нейтрали; переключателями положения нейтральных точек трансформаторов ТП 5, ТП 9, ТП 14 (К 5, К 9, К 14) включить сопротивление 100 Ом в нейтрали.

2. Установить в положение включено ввод напряжением 10 кВ центра питания ЦП 1, включить линию РЛ 11 выключателем В 11, питающую линию ПЛ 1 выключателями В'п1 и В''п1, секционный разъединитель СР, соединяющий секции С 1 и С2,

3. Включить устройство Rп1 замыкания на землю. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоке Н1, U_ϕ , U_L в блоке И9 и результаты занести в таблицу 3.1.

4. Отключить Rп1 и включить Rп2. В этой точке последовательно производим измерения для трёх случаев: Rп2=15 Ом, Rп2=7 Ом и Rп2=0,001 Ом. Для этого в диалоговом окне устройства замыкания в строке «Fault resistance Ron (Ohm):» задаём указанные значения. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоке Н1, U_ϕ , U_L в блоке И9 и результаты занести в таблицу 3.1.

5. Отключить Rп2 и включить Rп3. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоке Н1, U_ϕ , U_L в блоке И9 и результаты занести в таблицу 3.1.

6. Отключить Рп3 и включить Рп4. В этой точке Рп4=100 Ом. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоке Н1, U_{ϕ} , U_L в блоке И9 и результаты занести в таблицу 3.1.

7. Отключить Рп4. Включить РЛ 5, РЛ 6, РЛ 7. Включить нагрузку ТП-5, ТП-6, ТП-7, ТП-8, ТП-9. Включить Рп1. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоке Н1, U_{ϕ} , U_L в блоке И9 и результаты занести в таблицу 3.1. В блоке И9 открыть осциллограф и проследить за амплитудой напряжения в момент замыкания.

Содержание отчёта

1. Цель работы и краткие теоретические сведения.
2. Схема лабораторной установки.
3. Результаты измерений.
4. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Каковы достоинства и недостатки режима нейтрали сети, заземлённой через резистор в сети 6-10 кВ?
2. Чем такое коэффициент замыкания на землю?
3. Чем опасны большие токи замыкания на землю?
4. Как изменится значение перенапряжения при заземлении нейтрали через резистор при однофазном замыкании?
5. Как выбирается сопротивление резистора в сети с нейтралью, заземлённой через резистор?

Литература

1. Короткевич, М.А. Режимы нейтрали городской электрической сети / М.А. Короткевич, Д. Л. Жив. – Минск: БелНИИагро-энерго, 1997. – 68 с.
2. Сирота, И.М. Режимы работы нейтрали электрических сетей / И.М. Сирота, С.Н. Кисиленко, А.М. Михайлов. – Киев: Наукова думка, 1985. – 264 с.

Таблица 3.1 – Результаты измерений сети с нейтралью, заземлённой через резистор

Номер опыта	Операция	I_0 , А	Q_0 , квар	U_A , кВ	U_B , кВ	U_C , кВ	$U_{\Delta B}$, кВ	$U_{\Delta C}$, кВ	$U_{\Delta A}$, кВ	$U_{\Sigma A}$, кВ
1.	Включено Rп1									
2.	Отключено Rп1 Включено Rп2 Rп2=15 Ом Rп2=7 Ом Rп2=0,001 Ом									
3.	Отключено Rп2 Включено Rп3									
4.	Отключено Rп3 Включено Rп4									
5.	Отключено Rп4 Включено Rп1 Включены РЛ 5, РЛ 6, РЛ 7 Включена нагрузка ТП-5, ТП-6, ТП-7, ТП-8, ТП-9									

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С КОМПЕНСИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Цель работы: Исследование значений тока и перенапряжений при однофазном замыкании на землю в сетях с компенсированной нейтралью.

Краткие теоретические сведения

В тех случаях, когда ток замыкания на землю превышает допустимый, реализуют режим компенсированной нейтрали. В системе с компенсированной нейтралью применяют дугогасящие реакторы (ДГР), включаемые в нейтраль трансформаторов. Сети с компенсированной нейтралью имеют три режима работы: недокомпенсация, когда имеет место ёмкостный характер тока замыкания на землю, резонанс (идеальный режим сети) – значение тока замыкания на землю равно активной составляющей, перекомпенсация – у тока замыкания на землю преобладает индуктивный характер. При резонансной настройке ток замыкания на землю в месте замыкания приближается к нулю, что должно предотвращать повторные зажигания заземляющей дуги и связанные с этим перенапряжения. Заземление нейтралей через дугогасящие реакторы приводит к компенсации емкостных токов в месте замыкания и к снижению значения дуговых перенапряжений. Также при компенсированной нейтрали отсутствует необходимость в немедленном отключении первого однофазного замыкания на землю. Однако остаётся опасность возникновения больших кратностей перенапряжения.

При возникновении однофазных замыканий на землю в сети с расстройкой компенсации на 5...10% возможны повторные дуговые зажигания и перенапряжения, существенно превышающие фазное. При расстройке компенсации на 15...30% дуговые перенапряжения достигают 2,8-3,0 $U_{\text{ф}}$, что делает применение ДГР неэффективным.

При точной настройке ДГР после возникновения однофазных замыканий на землю и погасании тока дуги возможные повторные пробои происходят на напряжении меньшем или равном фазному, что

приводит к перенапряжениям на здоровых фазах, не превышающим $2,4 U_{\phi}$.

При неточной настройке ДГР процесс выравнивания напряжений фаз после погасания дуги носит характер биений, амплитуды и частота которых определяются степенью расстройки компенсации и добротностью колебательного контура.

Опасность биений состоит в том, что повторное замыкание может произойти при напряжении, близком к максимуму, что вызывает повышенные перенапряжения на здоровых фазах.

Устройства релейной защиты, основанные на токовом принципе, не обеспечивают селективности в условиях полной компенсации тока замыкания на землю. Для работы наиболее массовых устройств релейной защиты необходимо, чтобы ток однофазных замыканий на землю был больше тока срабатывания защиты $I_{ср}$ поэтому сети с ДГР часто эксплуатируют с перекомпенсацией емкостного тока однофазных замыканий на землю.

Порядок выполнения работы

1. Изучить краткие теоретические сведения.
2. Вычертить схему сети согласно заданию или согласно варианту, указанному преподавателем.

Рассмотрим следующие несколько вариантов схем сети:

- 1) питание подаётся от ЦП 1;
- 2) питание подаётся от ЦП 2;
- 3) питание подаётся от ЦП 1 через ПЛ 1.
3. Запустить файл Scheme1.mdl в программе Matlab Simulink.
4. С помощью коммутационных аппаратов на модели собрать схему сети с компенсированной нейтралью для указанного преподавателем варианта.

Рассмотрим указанные три варианта схемы сети.

Вариант №1

1. Установить в положение включено ввод напряжением 10 кВ центра питания ЦП 1, включить линию РЛ 2 выключателем В 2, трансформаторы ТП 5 –ТП 9, ТП 14.

2. В нейтрали трансформатора ТП 9 включить дугогасящий реактор переключателем К 9. Включить Рп1. Запустить схему. Снять

показания тока I_0 и Q_0 в блоке Н9, U_ϕ , U_L в блоке И1, открыть осциллограф и проследить за амплитудой напряжения в момент замыкания, результаты занести в таблицу 4.1.

3. В нейтрали трансформатора ТП 5 включить дугогасящий реактор переключателем К 5. Включить Рп1. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоках Н9 и Н5, U_ϕ , U_L в блоке И1, открыть осциллограф и проследить за амплитудой напряжения в момент замыкания, результаты занести в таблицу 4.1.

4. В нейтрали трансформатора ТП 14 включить дугогасящий реактор переключателем К 14. Включить Рп1. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоке Н1, U_ϕ , U_L в блоке И1, открыть осциллограф и проследить за амплитудой напряжения в момент замыкания, результаты занести в таблицу 4.1.

5. В нейтрали трансформатора ЦП 1 включить дугогасящий реактор переключателем К 14. Включить Рп1. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоке Н1, U_ϕ , U_L в блоке И1, открыть осциллограф и проследить за амплитудой напряжения в момент замыкания, результаты занести в таблицу 4.1.

В блоке И1 открыть осциллограф и проследить за амплитудой напряжения в момент замыкания.

Вариант №2

1. Установить в положение включено ввод напряжением 10 кВ центра питания ЦП 2, включить линию РЛ 9 выключателем В 9, трансформаторы ТП 5 – ТП 9, ТП 14.

2. В нейтрали трансформатора ТП 9 включить дугогасящий реактор переключателем К 9. Включить Рп1. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоке Н9, U_ϕ , U_L в блоке И7, открыть осциллограф и проследить за амплитудой напряжения в момент замыкания, результаты занести в таблицу 4.1.

3. В нейтрали трансформатора ТП 5 включить дугогасящий реактор переключателем К 5. Включить Рп1. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоках Н9 и Н5, U_ϕ , U_L в блоке И7, открыть осциллограф и проследить за амплитудой напряжения в момент замыкания, результаты занести в таблицу 4.1.

4. В нейтрали трансформатора ТП 14 включить дугогасящий реактор переключателем К 14. Включить Рп1. Запустить схему. Снять

показания тока I_0 и Q_0 в блоке Н2, U_ϕ , U_L в блоке И7, открыть осциллограф и проследить за амплитудой напряжения в момент замыкания, результаты занести в таблицу 4.1.

5. В нейтрали трансформатора ЦП 2 включить дугогасящий реактор переключателем К 14. Включить Рп1. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоке Н2, U_ϕ , U_L в блоке И7, открыть осциллограф и проследить за амплитудой напряжения в момент замыкания, результаты занести в таблицу 4.1.

Вариант №3

1. Установить в положение включено ввод напряжением 10 кВ центра питания ЦП 1, включить линию РЛ 11 выключателем В 11, питающую линию ПЛ 1 выключателями В'п1 и В''п1, секционный разъединитель СР, соединяющий секции С 1 и С2, трансформаторы ТП 5 –ТП 9, ТП 14.

2. В нейтрали трансформатора ТП 9 включить дугогасящий реактор переключателем К 9. Включить Рп1. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоке Н9, U_ϕ , U_L в блоке И9, открыть осциллограф и проследить за амплитудой напряжения в момент замыкания, результаты занести в таблицу 4.1.

3. В нейтрали трансформатора ТП 5 включить дугогасящий реактор переключателем К 5. Включить Рп1. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоках Н9 и Н5, U_ϕ , U_L в блоке И9, открыть осциллограф и проследить за амплитудой напряжения в момент замыкания, результаты занести в таблицу 4.1.

4. В нейтрали трансформатора ТП 14 включить дугогасящий реактор переключателем К 14. Включить Рп1. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоке Н1, U_ϕ , U_L в блоке И9, открыть осциллограф и проследить за амплитудой напряжения в момент замыкания, результаты занести в таблицу 4.1.

5. В нейтрали трансформатора ЦП 1 включить дугогасящий реактор переключателем К 14. Включить Рп1. Запустить схему. Снять показания тока I_0 и Q_0 в блоке Н1, U_ϕ , U_L в блоке И9, открыть осциллограф и проследить за амплитудой напряжения в момент замыкания, результаты занести в таблицу 4.1.

Содержание отчёта

1. Цель работы и краткие теоретические сведения.
2. Схема лабораторной установки.
3. Результаты измерений.
4. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Каковы достоинства и недостатки режима компенсированной нейтрали в сети 6-10 кВ?
2. Что такое компенсированная нейтраль?
3. Чем опасны большие токи замыкания на землю?
4. Чем опасны перенапряжения в сети при однофазном замыкания на землю?
5. В чём состоит опасность при вероятных неполнофазных режимах в сети с компенсированной нейтралью?

Литература

1. Короткевич, М.А. Режимы нейтрали городской электрической сети / М.А. Короткевич, Д. Л. Жив. – Минск: БелНИИагро-энерго, 1997. – 68 с.
2. Сирота, И.М. Режимы работы нейтрали электрических сетей / И.М. Сирота, С.Н. Кисиленко, А.М. Михайлов. – Киев: Наукова думка, 1985. – 264 с.

Таблица 4.1 – Результаты измерений сети с компенсированной нейтралью

Номер опыта	Операция	I_0 , А	Q_0 , квар	U_A , кВ	U_B , кВ	U_C , кВ	U_{AB} , кВ	U_{BC} , кВ	U_{CA} , кВ
1.	Включен ДГР в ТП 9, включено Rп1								
2.	Включен ДГР в ТП 9, ТП 5, включено Rп1								
3.	Включен ДГР в ТП 9, ТП 5, ТП 14, включено Rп1								
4.	Включен ДГР в ТП 9, ТП 5, ТП 14, ЦП, включено Rп1								

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ МЕСТ ДЕЛЕНИЯ ЗАМКНУТОЙ ГОРОДСКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Цель работы: Нахождение рациональных мест деления замкнутой электрической сети, обеспечивающих минимум потерь мощности.

Краткие теоретические сведения

Современные сложно-замкнутые городские электрические сети напряжением 6-10 кВ работают по разомкнутой схеме, что обеспечивает возможность перевода потребителей на резервное питание при отключении основного. Возникает задача определения рациональных мест деления городской электрической сети, так как от выбора места деления зависят суммарные потери мощности в сети.

Рациональные места размыкания замкнутой схемы городской электрической сети (рис. 5.1) с однострансформаторными подстанциями устанавливают для осенне-зимнего максимума и весенне-летнего минимума нагрузок. Для выполнения поставленной задачи последовательно намечаются места размыкания замкнутой схемы (P1,...P12). Далее определяется потокораспределение на участках линий при намеченных местах её размыкания, потери мощности на каждом участке схемы и сети в целом.

По известным потокам мощности по участкам линий L_i ($i=1, \dots, 7$) и сопротивлениям этих участков находятся нагрузочные потери мощности на этих участках. Сумма нагрузочных потерь по каждому участку линии представляет собой потери мощности по всей схеме сети.

Наиболее рациональное место размыкания замкнутой электрической сети 6-10 кВ соответствует наименьшему значению нагрузочных потерь мощности в схеме сети.

Однако следует указать, что расчёты несколько усложняются, а результаты могут не соответствовать вышеполученным, если в качестве критерия оптимальности принять минимум потерь энергии в сети. В этом случае необходимо знать число часов использования максимума нагрузки каждого потребителя, то есть $T_{\max j}$. Далее, в соответствии с потокораспределением, можно определить $T_{\max i}$, то есть

число часов использования максимума нагрузки по каждому участку петлевой линии.

Оптимальному месту размыкания петлевой линии соответствует значение потерь энергии в сети.

Порядок выполнения работы

1. Изучить краткие теоретические сведения.
2. Вычертить схему сети.
3. Запустить файл Scheme5.mdl в программе Matlab Simulink.
4. Последовательно задавая места размыкания в схеме (P1-P12), снять показания потоков мощности по ветвям сети в блоках измерения (W1-W7). Результаты измерений занести в таблицу 5.1.
5. Определить рациональное место деления сети, соответствующее наименьшим суммарным потерям мощности.

$$\sum_{i=1}^n \Delta P_i = \frac{1}{U_{\text{НОМ}}^2} \sum_{i=1}^n P_i^2 R_i, \quad (5.1)$$

где ΔP - потери мощности на i -ом ($i=1, \dots, n$) участке сети, кВт;

P_i - мощность, протекающая по i -ому участку сети, кВт;

R_i - сопротивление i -го участка сети (на схеме можно найти, открыв диалоговое окно элемента линии электропередачи Л1-Л7, в строке «Resistance R (Ohms)»), Ом;

$U_{\text{НОМ}}$ - номинальное напряжение сети ($U_{\text{НОМ}}=10$ кВ), кВ.

Содержание отчёта

1. Цель работы и краткие теоретические сведения.
2. Схема сети.
3. Результаты измерений.
4. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Почему существующие сети напряжением 6-10 кВ работают в разомкнутом режиме?
2. Какой критерий оптимальности принимался в данной работе при определении оптимальных мест размыкания замкнутой сети?
3. Какие критерии оптимальности для определения мест размыкания сети Вы знаете?

4. Как определить оптимальное место размыкания расчётным путём?

5. Как определить потери энергии в сети?

Таблица 5.1 – Результаты расчёта потоков мощности по линиям, кВт

Номер опыта	Место разрыва сети	Л1	Л2	Л3	Л4	Л5	Л6	Л7
1.	В1							
2.	Р2							
3.	Р3							
4.	Р4							
5.	Р5							
6.	Р6							
7.	Р7							
8.	Р8							
9.	Р9							
10.	Р10							
11.	Р12							
12.	В2							

Литература

1. Короткевич, М.А. Эксплуатация электрических сетей / М.А. Короткевич. – Минск: Вышэйшая школа, 2014. – 350 с.

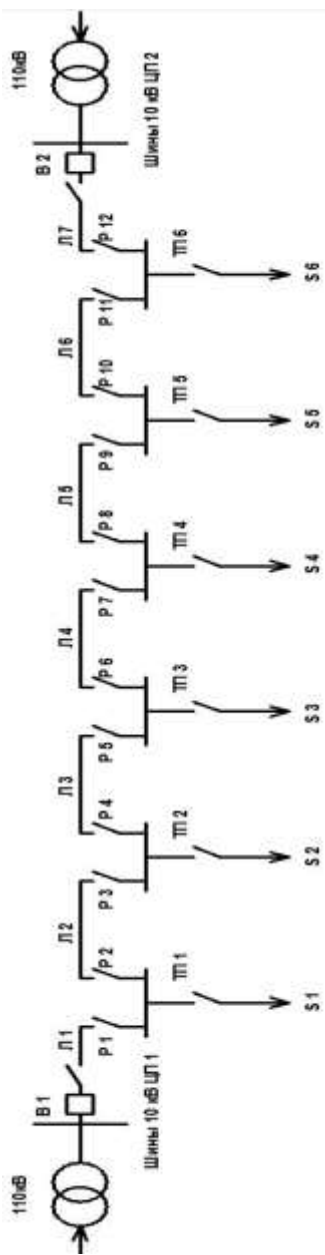


Рисунок 5.1 – Участок замкнутой схемы городской электрической сети

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

ПЛАВКА ГОЛОЛЁДА НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Цель работы: Ознакомление со способами плавки гололёда, расчётом тока плавки на проводах воздушных линий электропередачи.

Краткие теоретические сведения

При перемещении воздуха над поверхностью земли тёплые массы, содержащие влагу в виде паров воды, приходят в соприкосновение с холодным воздухом. В пограничном слое этих двух масс воздуха создаются условия для существования переохлаждённых паров воды, которые, соприкасаясь с металлическими элементами линий электропередачи при температуре ниже нуля, образуют на них кристаллы льда. Капли тумана, дождя и мокрый снег, оседающие на проводах, тросах и конструкциях опор, имеющих отрицательную температуру, также образуют лёд или смёрзшуюся вокруг проводов ледяную массу. Это явление называется гололёдом. Гололёд представляет собой сплошной твёрдый осадок в виде прозрачного или матового льда с расчётной плотностью 900 кг/м^3 .

При значительных гололёдных отложениях возможна поломка деталей опор или самих опор, а также обрывы проводов из-за механических нагрузок или «пляски», сближение проводов между собой или приближение к заземляющим конструкциям на недопустимое расстояние. Во избежание отмеченных неблагоприятных последствий должны быть приняты меры по удалению гололёда с проводов линии.

Наиболее эффективный и оперативный способ борьбы с обледенением проводов – плавка гололёда электрическим током – позволяющий освободить провода воздушных линий от гололёда в течение 20-60 минут.

Так как рабочие токи линий электропередачи обычно недостаточны для плавки гололёда, то повышение токовой нагрузки линий можно обеспечить за счёт оперативного перераспределения нагрузок (в этом случае линия не отключается на время плавки гололёда) или устройством на отключенных линиях однофазных, двухфазных или трёхфазных коротких замыканий. Здесь в систему плавки гололёда входят специальные трансформаторы, используемые только для

плавки гололёда и обеспечивающие ток плавки, равный или превышающий не более, чем в 1,5 раза длительно допустимый ток нагрузки данной линии (на линиях напряжением до 220 кВ) или источники постоянного тока (выпрямительные устройства, фильтры для подавления высших гармоник) на линиях напряжением 330 кВ и выше. При этом напряжение системы плавки гололёда – ниже номинального, а ток плавки – больше минимального рабочего и меньше 1,5 допустимого. Допустимая температура нагрева сталеалюминевых проводов принимается 100°С, стальных тросов – 250°С.

Схемы плавки гололёда представлены на рисунке 6.1.

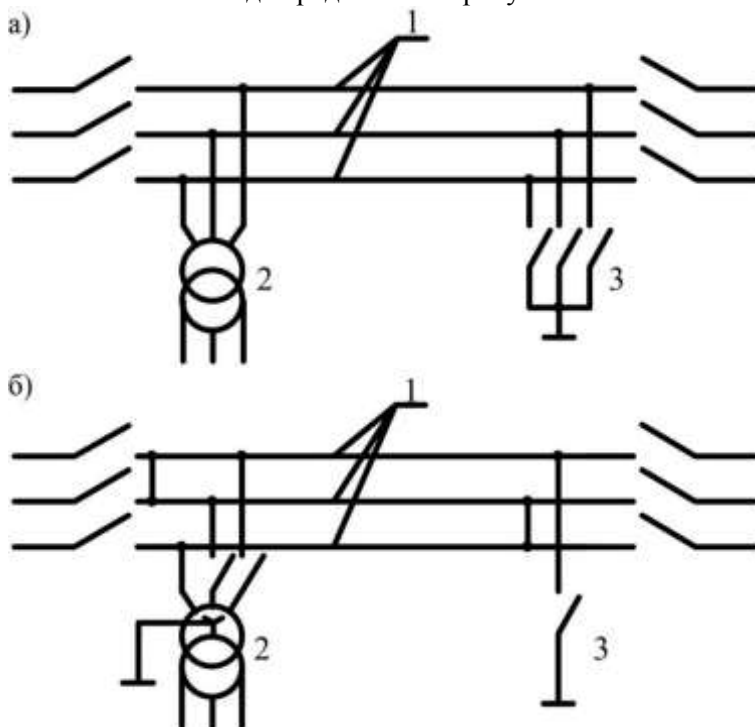


Рисунок 6.1 –Схемы плавки гололёда

а) током однофазного, двухфазного или трёхфазного короткого замыкания;

б) током короткого замыкания при последовательном соединении всех фаз в «змейку» и питании от трансформатора 2.

1 – провода линии электропередачи с гололёдом; 2 – силовой трансформатор для плавки гололёда; 3 – заземляющая закоротка.

Наиболее простой и удобный метод – метод трёхфазного короткого замыкания в конце линии. Здесь плавка производится сразу на трёх фазах. Ток плавки равен

$$I_{\text{ПЛ}} = \frac{U}{\left(\sqrt{3}z_0l\right)}, \quad (6.1)$$

где U – линейное напряжение источника тока плавки гололёда (трансформатора 2);

z_0 – полное сопротивление 1 километра линии:

$$z_0 = \sqrt{r_0^2 + x_0^2}, \quad (6.2)$$

r_0, x_0 – соответственно активное и индуктивное сопротивление 1 километра линии;

l – длина линии.

По способу двухфазного короткого замыкания в конце линии плавка производится сначала на двух фазах, а затем на третьей в сочетании с одним из освободившихся от гололёда проводов. В этом случае

$$I_{\text{ПЛ}} = \frac{U}{\left(2z_0l\right)}. \quad (6.3)$$

Схема на рисунке 6.1 б применяется на коротких линиях, когда имеющееся напряжение велико для плавки по методу трёхфазного короткого замыкания. Ток плавки

$$I_{\text{ПЛ}} = \frac{U_{\phi}}{z}, \quad (6.4)$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение источника плавки;

z – полное сопротивление пути тока плавки:

$$z_0 = \sqrt{\left(3r_0l + 2R_3 + R_{\text{зем}}l\right)^2 + \left(3x_0l\right)^2}, \quad (6.5)$$

R_3 – активное сопротивление заземления;

$R_{\text{зем}}$ – активное сопротивление земли, принимается равным 0,05 Ом/км.

Если ток плавки в схеме трёхфазного короткого замыкания оказывается недостаточным, то применяется встречное включение фаз. Здесь на одном конце линии провода присоединяются к фазам А, В и С, а на другом – к фазам В, С, А соответственно (рисунок 6.2).

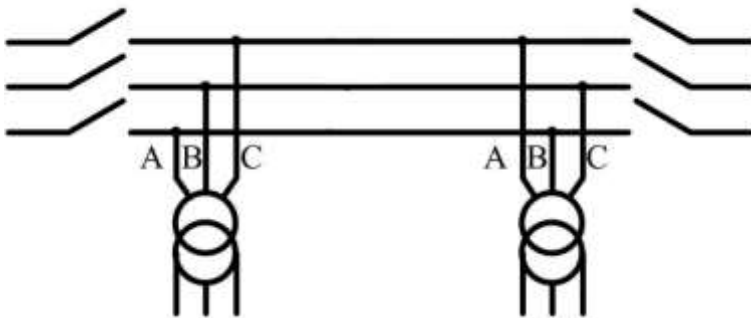


Рисунок 6.2 – Встречное включение фаз.

Тогда ток плавки равен

$$I_{\text{ПЛ}} = \frac{U}{(z_0 l)}. \quad (6.6)$$

На линиях с проводами больших сечений применяется плавка гололёда постоянным током.

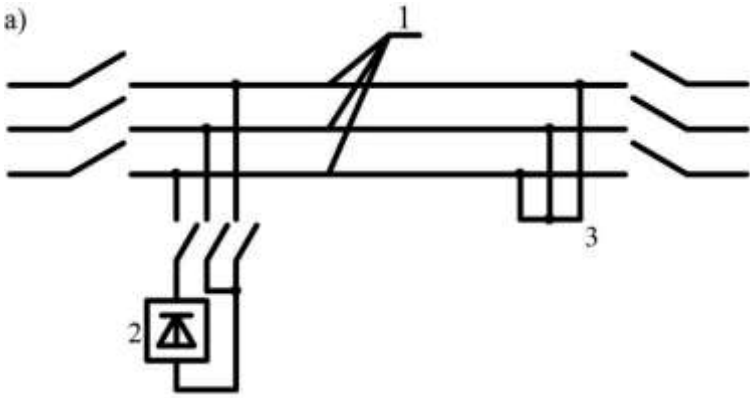
Для коротких линий применяется схема рисунок 6.1 б, где вместо трансформатора 2 используется источник постоянного тока.

Ток плавки

$$I_{\text{ПЛ}} = \frac{U_{\equiv}}{3r_0 l + 2R_{\text{зем}}}. \quad (6.7)$$

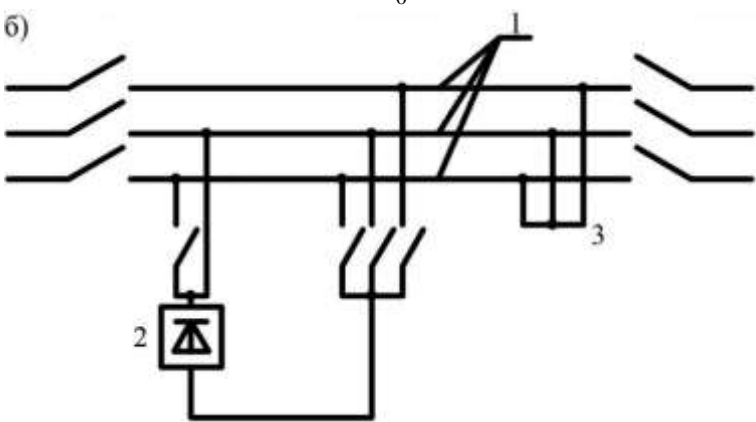
где U_{\equiv} - напряжение источника постоянного тока.

Могут применяться схемы «провод-провод» (рисунок 6.3 а), «провод-два провода» (рисунок 6.3 б) (для протяжённых линий) и «провод-земля» (рисунок 6.3 в).



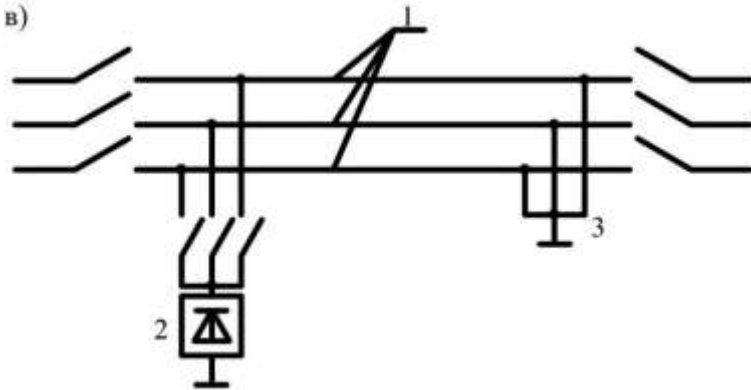
Ток плавки

$$I_{\text{ПЛИ}} = \frac{U_{\text{н}}}{2r_0 l} \quad (6.8)$$



Ток плавки

$$I_{\text{ПЛИ}} = \frac{U_{\text{н}}}{1,5r_0 l} \quad (6.9)$$



Ток плавки

$$I_{\text{ПЛ}} = \frac{U_{\text{=}}}{r_0 l + 2R_3} \cdot \quad (6.10)$$

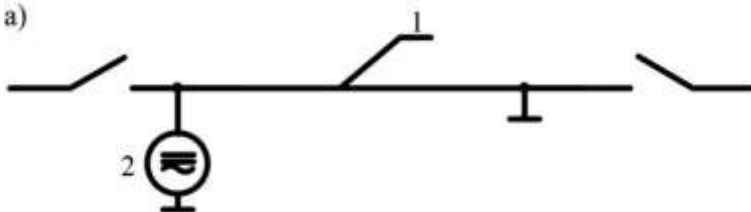
Рисунок 6.3 – Схемы плавки гололёда постоянным током:

а) провод-провод; б) провод-два провода; в) провод-земля.

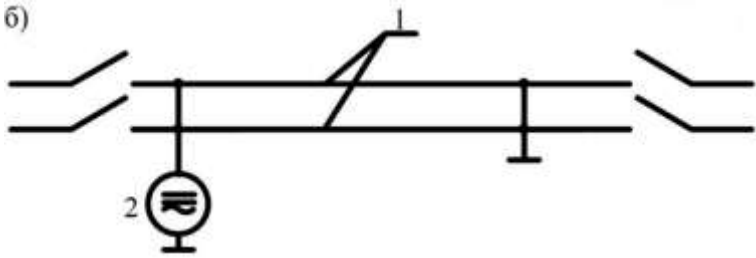
1 – провода линии передачи; 2 – выпрямительная установка; 3 – трёхфазная коротка в конце линии.

При необходимости проведения плавки гололёда на тросах их необходимо изолировать от металлических и железобетонных опор или отсоединить заземляющие спуски от контуров заземления на линиях с деревянными опорами.

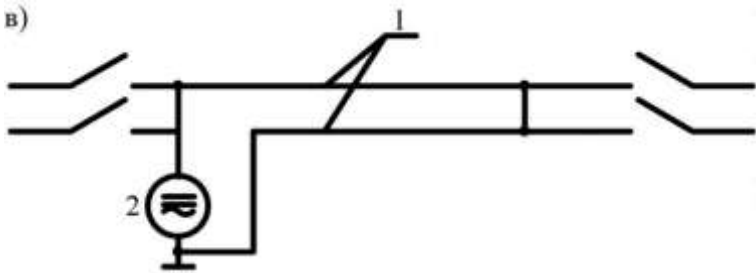
Применяются следующие схемы плавки гололёда на тросах: «трос-земля» (рисунок 6.4 а), «два троса-земля» (рисунок 6.4 б), «трос-трос» (рисунок 6.4 в). Постоянный ток плавки соответственно равен:



$$I_{\text{ПЛ}} = \frac{U_{\text{=}}}{r_{0\text{т}} l + 2R_3} \cdot \quad (6.11)$$



$$I_{\text{ПЛ}} = \frac{U_{\text{=}}}{0,5r_{0\text{T}}l + 2R_3} \quad (6.12)$$



$$I_{\text{ПЛ}} = \frac{U_{\text{=}}}{2r_{0\text{T}}l} \quad (6.13)$$

Рисунок 6.4 – Схемы плавки гололёда на грозозащитных тросах:

1 – трос; 2 – источник постоянного или переменного тока.

где $r_{0\text{T}}$ – активное сопротивление одного километра троса (зависит от тока плавки и находится по соответствующим таблицам).

Переменный ток плавки в рассматриваемых случаях определяется как

для схемы «трос-земля»

$$I_{\text{ПЛ}} = \frac{U_{\text{ф}}}{\sqrt{(r_{0\text{T}}l + 2R_3 + R_{\text{зем}}l)^2 + (x_{0\text{T}}l)^2}}; \quad (6.14)$$

для схемы «два троса-земля»

$$I_{\text{ПЛ}} = \frac{U_{\text{ф}}}{\sqrt{(0,5r_{0\text{T}}l + 2R_3 + R_{\text{зем}}l)^2 + (0,5x_{0\text{T}}l)^2}}; \quad (6.15)$$

для схемы «трос-трос»

$$I_{\text{ПЛ}} = \frac{U_{\text{Ф}}}{\sqrt{(2r_{0\text{T}}l)^2 + (2x_{0\text{T}}l)^2}}. \quad (6.16)$$

Порядок выполнения работы

1. Изучить краткие теоретические сведения.
2. Для заданного преподавателем варианта (таблица 6.1) определить значения переменного и постоянного тока плавки гололёда на проводах и грозозащитных тросах всеми способами плавки и сравнить их с длительно допустимым током.
3. Запустить файл Scheme6.mdl в программе Matlab Simulink.
4. На схеме последовательно задать значения сопротивлений проводов и тросов для указанного варианта. Для этого нужно открыть диалоговое окно элемента линии электропередачи Л1-Л7 и троса Т1-Т10, в строке «Resistance R (Ohms)» вписать значение активного сопротивления в Ом, а индуктивное сопротивление задаётся в строке «Inductance L (H)» через индуктивность L в Гн, которая определяется по формуле (6.17).

$$L = \frac{x}{\omega}, \quad (6.17)$$

где ω - угловая частота ($\omega=2\pi f$; $f=50$ Гц).

5. Согласно своему варианту установить напряжение на источниках питания. Для этого следует открыть диалоговое окно элемента, в источниках питания U1-U4 напряжение задаётся в строке «Phase-to-phase voltage (Vrms)», в источниках питания U5-U8 и Ут1-Ут3 в строке «Amplitude (V)», для источников питания Ут1-Ут3 напряжение вписывается в строку «Peak amplitude (V)».
6. Запустить схему. В блоках И1-И7 и Ит1-Ит6 снять показания токов и сверить с результатами расчёта.

Содержание отчёта

1. Цель работы и краткие теоретические сведения.
2. Схемы плавки гололёда на проводах и тросах воздушных линий электропередачи.
3. Полученные значения тока для различных схем плавки гололёда.
4. Ответы на контрольные вопросы.

Таблица 6.1 – Варианты заданий на выполнение лабораторной работы

Номер варианта	Марка провода	Марка троса	Длина линии, км	Линейное напряжение, кВ
1.	АС-70	ТК 8	50	10
2.	АС-120	ТК 9,1	80	10
3.	АС-240	ТК 9,1	100	35
4.	АС-300	ТК 11	120	35
5.	2АС-300	2ТК 11	150	110
6.	2АС-500	2ТК 11	200	220

Контрольные вопросы

1. Что такое гололёд?
2. Какова опасность гололёдных отложений на проводах и грозозащитных тросах воздушных линий электропередачи?
3. Какие существуют схемы для плавки гололёда на линиях электропередачи?
4. В каких случаях применяется встречное включение трансформаторов для плавки гололёда?
5. Как определить ток плавки гололёда и время плавки?

Литература

1. Андриевский, В.Е. Эксплуатация воздушных линий электропередачи / В.Е. Андриевский, А.Т. Голованов, А.С. Зеличенко. – М.: Энергия, 1976. – 616 с.
2. Короткевич, М.А. Эксплуатация электрических сетей / М.А. Короткевич. – Минск: Вышэйшая школа, 2014. – 350 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

ОЦЕНКА МЕРОПРИЯТИЙ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Цель работы: Изучение влияния технических мероприятий на повышение пропускной способности электрической сети.

Краткие теоретические сведения

Под пропускной способностью линии электропередачи понимается та максимальная мощность, которая может быть по ней передана.

Пропускная способность электрической сети ограничивается:

- допустимым нагревом проводникового материала;
- допустимой потерей напряжения (для местных электрических сетей);
- условиями устойчивости параллельной работы передающей и приёмной энергосистем.

В связи с ростом нагрузок и присоединением новых потребителей возникает необходимость изменения как режимных, так и схемных параметров электрической сети с целью повышения её пропускной способности. Последнее может быть осуществлено различными способами:

- повышением номинального напряжения сети;
- рациональным регулированием напряжения;
- применением продольной ёмкостной компенсации;
- применением поперечной компенсации реактивной мощности;
- увеличением площади поперечного сечения проводов путём их замены или сооружением участка параллельной линии электропередачи;
- сооружением дополнительных питающих подстанций и так далее.

Естественно, что выбор того или иного мероприятия повышения пропускной способности электрической сети должен проводиться в результате тщательного технико-экономического анализа на основе,

например, минимума приведенных затрат на передачу и распределение электроэнергии.

В данной лабораторной работе мы будем изучать технические возможности мероприятий повышения пропускной способности электрической сети.

а) Повышение номинального напряжения сети

Пропускная способность сети P при номинальном напряжении U_H и заданном сечении проводов определяется по выражению:

$$P = \sqrt{3} U_H I_{\text{доп}} \cos \varphi, \quad (7.1)$$

где $I_{\text{доп}}$ - допустимый ток сети. При повышении номинального напряжения до U_{H1} , ($U_{H1} > U_H$) пропускная способность сети P_1 при том же $\cos \varphi$ станет равной:

$$P_1 = \sqrt{3} U_{H1} I_{\text{доп}} \cos \varphi = P \cdot \frac{U_{H1}}{U_H}. \quad (7.2)$$

Таким образом, имеем повышение пропускной способности в $\frac{U_{H1}}{U_H}$ раз.

Увеличение пропускной способности:

$$\delta P = P_1 - P = P \left(\frac{U_{H1}}{U_H} - 1 \right). \quad (7.3)$$

При ограничении пропускной способности по условию допускаемой потери напряжения $\Delta U_{\text{доп}}$ передаваемая мощность при $\cos \varphi = 1$ равна:

$$P = \frac{\Delta U_{\text{доп}\%}}{100} \cdot \frac{U_H^2}{r}, \quad (7.4)$$

где r - активное сопротивление сети.

После перевода сети на другое, более высокое, номинальное напряжение:

$$P_1 = \frac{\Delta U_{\text{доп}\%}}{100} \cdot \frac{U_{H1}^2}{r}. \quad (7.5)$$

Увеличение пропускной способности:

$$\delta P = P_1 - P = \frac{\Delta U_{\text{доп}\%}}{100} \cdot \frac{1}{r} (U_{H1}^2 - U_H^2). \quad (7.6)$$

б) Рациональное регулирование напряжения

Потери мощности в активных и реактивных сопротивлениях электрической сети обратно пропорциональны квадрату напряжения сети. При повышении уровня напряжения сети относительно номинального на $a\%$ потери активной мощности станут:

$$\Delta P = \frac{S^2}{U_H^2 \left(1 + \frac{a\%}{100}\right)}. \quad (7.7)$$

Уменьшение потерь активной мощности $\delta \Delta P$ и, следовательно, увеличение пропускной способности сети δP составит:

$$\delta \Delta P = \delta P = \Delta P - \Delta P_1 = \frac{S^2}{U_H^2} r \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{a\%}{100}\right)^2} \right] + \sqrt{3} a\% \cdot 10^{-2} U_H I \cos \varphi. \quad (7.8)$$

Применение трансформаторов с РПН (регулированием напряжения под нагрузкой) позволяет осуществить встречное регулирование напряжения и увеличить допустимую потерю напряжения.

Допустимая потеря напряжения в сети:

$$\Delta U_{\text{доп}} = U - U_{\text{доп}} = \sqrt{3} I (r \cdot \cos \varphi + x \cdot \sin \varphi), \quad (7.9)$$

где I - ток нагрузки, который можно максимально передать по сети из условий обеспечения допустимых отклонений у потребителей;

r, x - соответственно активное и индуктивное сопротивления сети;

$U_{\text{доп}}$ - допустимый уровень напряжения у потребителя;

φ - угол между напряжением и током;

U - напряжение в центре питания.

При встречном регулировании в центре питания обеспечивается напряжение $U_1 > U$.

Тогда допустимая потеря напряжения:

$$\Delta U_{\text{доп1}} = U_1 - U_{\text{доп}} = \sqrt{3} I_1 (r \cdot \cos \varphi + x \cdot \sin \varphi). \quad (7.10)$$

При неизменном коэффициенте мощности можно записать:

$$\frac{\Delta U_{\text{доп}}}{\Delta U_{\text{доп1}}} = \frac{I}{I_1}, \text{ или } I_1 = I \frac{\Delta U_{\text{доп1}}}{\Delta U_{\text{доп}}}, \text{ или } P_1 = P \frac{\Delta U_{\text{доп1}}}{\Delta U_{\text{доп}}}. \quad (7.11)$$

Так как $\Delta U_{\text{доп1}} > \Delta U_{\text{доп}}$, то и $P_1 > P$.

Следовательно, увеличение пропускной способности составит значение:

$$\delta P = P_1 - P = P \left(\frac{\Delta U_{\text{доп1}}}{\Delta U_{\text{доп}}} - 1 \right). \quad (7.12)$$

в) Продольная емкостная компенсация линии передачи

В сетях свыше 330 кВ при $x \gg r$ пропускная способность ограничивается условиями устойчивости параллельной работы, то есть:

$$P = \frac{U_1 U_2}{x_3} \sin \theta, \quad (7.13)$$

где U_1, U_2 - напряжение по концам передачи;

θ - угол между векторами U_1 и U_2 ;

x_3 - эквивалентное сопротивление системы передачи.

Включение последовательно в линию статических конденсаторов сопротивлением x_c приводит к уменьшению значения x_3 и, следовательно, к увеличению пропускной способности на

$$\delta P = \frac{x_c}{x_3 - x_c} \cdot \frac{U_1 U_2}{x_3} \sin \theta = \frac{K_c}{1 - K_c} \cdot \frac{U_1 U_2}{x_3} \sin \theta, \quad (7.14)$$

где $K_c = \frac{x_c}{x_3}$ - степень продольной компенсации. В нашем случае

$x_3 = x_{\text{л}}$.

Если при заданном сечении проводов пропускная способность сети ограничивается допустимой потерей напряжения ($\Delta U_{\text{доп}}$), то её также можно повысить с помощью продольной компенсации.

Потеря напряжения в линии может быть определена по формуле:

$$\Delta U = \frac{Pr + Qx}{U} = P \frac{r + x \operatorname{tg} \varphi}{U}. \quad (7.15)$$

Отсюда для заданной допустимой потери напряжения значение максимальной передаваемой мощности:

$$P = \frac{\Delta U_{\text{доп}} U_{\text{Н}}}{r + x \cdot \operatorname{tg} \varphi} \quad \text{или} \quad P_1 = \frac{\Delta U_{\text{доп1}} U_1}{r + x \cdot \operatorname{tg} \varphi}. \quad (7.16)$$

После включения продольной компенсации:

$$P_1 = \frac{\Delta U_{\text{доп}} U}{r + x(1 - K_c) \operatorname{tg} \varphi}. \quad (7.17)$$

Увеличение пропускной способности:

$$\delta P = P_1 - P = \Delta U_{\text{доп}} U_{\text{H}} \left[\frac{1}{r + x(1 - K_c) \operatorname{tg} \varphi} - \frac{1}{r + x \cdot \operatorname{tg} \varphi} \right]. \quad (7.18)$$

г) Поперечная компенсация реактивной мощности

Поперечная компенсация широко применяется в местных сетях для регулирования напряжения и снижения потерь мощности и энергии. В результате разгрузки сети от потоков реактивной мощности с помощью поперечной компенсации удаётся больше загрузить сеть активной мощностью.

Пусть пропускная способность сети ограничена длительно допустимым током нагрева.

Для того, чтобы без увеличения тока повысить передаваемую активную мощность, надо разгрузить сеть от потока реактивной мощности, включив в узле нагрузки компенсирующее устройство мощностью Q_c .

Активная мощность, передаваемая по сети до компенсации:

$$P = \frac{Q}{\operatorname{tg} \varphi}. \quad (7.19)$$

После компенсации при неизменном коэффициенте мощности:

$$Q = P \cdot \operatorname{tg} \varphi \text{ и } Q_1 = P_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi - Q_c; \quad (7.20)$$

$$P_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi - \sqrt{S^2 - P_1^2} = Q_c. \quad (7.21)$$

Увеличение пропускной способности $\delta P = P_1 - P$.

При необходимости сохранения прежнего значения передаваемой полной мощности и установки компенсирующих устройств улучшается коэффициент мощности нагрузки, угол φ уменьшается до значения φ_1 . Тогда из соотношения (7.20):

$$Q_c = Q' - Q_1 = P_1 \operatorname{tg} \varphi - P_1 \operatorname{tg} \varphi_1 = P_1 (\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_1). \quad (7.22)$$

Значение P_1 также может быть найдено:

$$P_1 = \frac{Q_c}{\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi_1}. \quad (7.23)$$

Увеличение пропускной способности:

$$\delta P = P_1 - P = \frac{Q_c}{\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi_1} - \frac{Q}{\operatorname{tg}\varphi}. \quad (7.24)$$

При ограничении пропускной способности сети допустимой потерей напряжения установка компенсирующего устройства уменьшит реактивную мощность по сети и соответственно реактивную составляющую потери напряжения. За счёт этого можно увеличить активную мощность до такой величины, при которой общая потеря напряжения останется неизменной.

Исходя из равенства потерь напряжения до и после компенсации, можно записать:

$$Pr + Qx = P_1r + Q_1x. \quad (7.25)$$

Тогда получим выражения:

$$Pr + Px \cdot \operatorname{tg}\varphi = P_1r + P_1x \cdot \operatorname{tg}\varphi - Q_c x \text{ и } P_1 = P + \frac{Q_c}{r + x \cdot \operatorname{tg}\varphi} \quad (7.26)$$

Увеличение пропускной способности сети:

$$\delta P = P_1 - P = \frac{Q_c}{r + x \cdot \operatorname{tg}\varphi}. \quad (7.27)$$

д) Увеличение площади поперечного сечения проводов линий электропередачи или сооружение параллельной линии

При увеличении площади сечения проводов линии с F до F_1 ($F_1 > F$) их сопротивление уменьшается с r до r_1 ($r_1 < r$), потери мощности уменьшаются на величину:

$$\delta \Delta P = \frac{S^2}{U_H^2} r \left(1 - \frac{r_1}{r}\right) = \frac{S^2}{U_H^2} \cdot \frac{l}{\gamma F} \left(1 - \frac{F_1}{F}\right) + \sqrt{3} U_H (I_{д1} - I_{д}) \cos \varphi. \quad (7.28)$$

На эту же величину повышается пропускная способность передачи.

е) Сооружение дополнительных питающих подстанций

Для развития электрической сети характерно постепенное увеличение длины линий. На некотором этапе развития сети в зоне небольшого удаления от питающих подстанций создаются условия, обеспечивающие экономическую целесообразность сооружения дополнительной питающей подстанции. В этом случае существующие линии передачи разгружаются, уровни напряжения удалённых потребителей повышаются, что приводит при ограничении по допустимой потере напряжения к повышению пропускной способности сети.

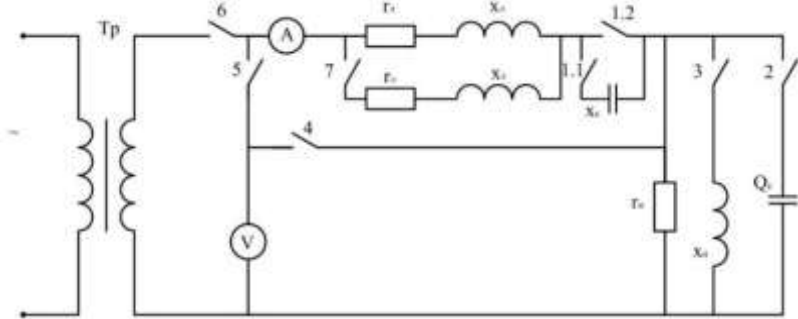


Рисунок 7.1 – Схема лабораторной установки

Таблица 7.1 – Параметры линии электропередачи

№ вар.	$U_{ном}$, кВ	Марка провода	Длина линии, км	r_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км	$I_{доп}$, А
1	35	АС-70	30	0,45	0,382	265
2	35	АС-95	35	0,33	0,371	330
3	6	АС-16	3,0	1,96	0,401	105
4	6	АС-25	4,0	1,27	0,4	130
5	6	АС-35	5,0	0,91	0,4	175
6	6	АС-50	6,0	0,63	0,4	210
7	10	АС-35	8,0	0,81	0,3	175
8	10	АС-50	10	0,63	0,4	210
9	10	АС-70	30	0,45	0,39	265
10	110	АС-240	120	0,118	0,43	610

Порядок выполнения работы

1. Изучить теоретическую часть.
2. Для заданного преподавателем варианта определить увеличение пропускной способности, результаты занести в таблицу 7.2.

3. Запустить файл “Scheme7.mdl” в среде Matlab Simulink.

а) Повышение номинального напряжения сети:

1. Установить нужное напряжение на источнике напряжения U_H , открыть его диалоговое окно и записать значение в строку «Peak amplitude (V)»;

2. Включить выключатели 6, 1.2, выключатели 7, 1.1, 3, 2 отключены;

3. Измерить напряжение по концам передачи и ток в начале линии;

4. Повысить напряжение на источнике напряжения U_H , до соответствующего ближайшему большему значению номинального напряжения;

5. Зафиксировать значение напряжения при прежнем значении тока;

6. Определить передаваемую мощность при первоначальном напряжении и при повышении напряжения $P=U_H I$; $P_1=U_{H1} I$;

7. Определить увеличение передаваемой мощности

$$\delta P_{\%} = \frac{\delta P}{P} \cdot 100\% = \left(\frac{U_{H1}}{U_H} - 1 \right) \cdot 100\% . \quad (7.29)$$

б) Увеличение площади сечения проводов линий в два раза

1. Установить исходное напряжение на источнике напряжения U_H ;

2. Включить выключатель 3, выключатели 7, 1.1, 2 отключены, выключатели 6, 1.2 включены;

3. Измерить ток и напряжение по концам передачи;

4. Включить выключатель 7 и измерить ток в начале линии;

5. Определить увеличение пропускной способности передачи за счёт снижения потерь мощности и увеличения тока до I_1

$$\delta P_{\%} = \left(1 - \frac{1}{2} \frac{I_1^2}{I^2} \right) \cdot 100\% . \quad (7.30)$$

в) Продольная емкостная компенсация

1. Установить исходное напряжение на источнике напряжения U_H ;

2. Включить выключатели 6, 3 и 1.2, выключатели 7, 1.1, 2 отключены;
3. Измерить ток и напряжение по концам линии;
4. Включить выключатель 1.1 и отключить выключатель 1.2, измерить ток в начале линии;
5. Определить увеличение пропускной способности

$$\delta P_{\%} = \left(\frac{I_1}{I} - 1 \right) \cdot 100\% . \quad (7.31)$$

г) Поперечная емкостная компенсация

1. Установить исходное напряжение на источнике напряжения $U_{н}$;
2. Включить выключатели 6, 3 и 1.2, выключатели 7, 1.1, 2 отключены;
3. Измерить ток и напряжение по концам линии;
4. Включить выключатель 2 и измерить ток в начале линии;
5. Определить увеличение пропускной способности

$$\delta P_{\%} = \left(\frac{I_1}{I} - 1 \right) \cdot 100\% . \quad (7.32)$$

Результаты измерений оформить в виде таблицы 7.2.

Содержание отчёта

1. Цель работы и краткие теоретические сведения.
2. Схема установки рисунок 1.2.
3. Результаты измерений и вычислений (таблица 7.2).
4. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Что называется пропускной способностью электрической сети?
2. Чем ограничивается пропускная способность электрической сети?
3. Назовите мероприятия, обеспечивающие повышение пропускной способности электрической сети.
4. Укажите дополнительные затраты, связанные с повышением номинального напряжения сети.

5. Как влияет продольная емкостная компенсация на пропускную способность сети?

6. Как изменяется пропускная способность сети при замене сечений проводов линии или сооружении участков параллельной линии?

7. Как проводится выбор того или иного мероприятия повышения пропускной способности электрической сети?

Таблица 7.2 – Результаты измерений и вычислений

Наименование мероприятия	Повышение пропускной способности $\delta P\%$		Выводы
	На модели	Расчётное значение	
Повышение номинального напряжения		формула (7.3)	
Увеличение сечения проводов		формула (7.28)	
Продольная емкостная компенсация		формула (7.18)	
Поперечная емкостная компенсация		формула (7.23)	

Литература

1. Гурский, С.К. Оптимизация режимов энергосистем / С.К. Гурский, Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин. – Минск: БПИ, 1977. – 63 с.

2. Керного, В.В. Местные электрические сети / В.В. Керного, Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин. – Минск: Высшая школа, 1972. – 364 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Цель работы: Ознакомление с порядком переключений при включении и отключении линий электропередачи тупикового типа, а также спаренных и транзитных линий.

Краткие теоретические сведения

При включении и отключении линий электропередачи с автоматическим повторным включением (АПВ) используются местные инструкции, разрабатываемые на основе типовых

1. При отключении воздушных и кабельных линий тупикового типа первым рекомендуется отключить выключатель со стороны нагрузки, вторым – со стороны питания.

Включение осуществляется в обратной последовательности.

2. При отключении линий, отходящих от подстанций, первым, как правило, следует отключить выключатель со стороны подстанций, вторым – выключатель со стороны энергосистемы.

Подавать напряжение на линию при её включении следует, как правило, со стороны энергосистемы.

Включение или отключение одной из двух спаренных линий при отключенной другой (вторая линия отключена) (рисунок 8.1)

Включение одной из спаренных линий, например Л2, при находящийся в работе линии Л1, должно выполняться, как правило, после отключения линии Л1, находящейся в работе, независимо от расположения линейного разъединителя каждой линии.

Для этого необходимо:

отключить выключатель В1 линии Л1;

отключить выключатель В3 линий Л1 и Л2 со стороны питания;

включить линейные разъединители РЛ2 и РЛ4 линии Л2 и шинный разъединитель РШ2;

включить выключатель В3;

включить выключатели В1 и В2 со стороны нагрузки (п/с Б и В).

Допускается включение (отключение) одной из спаренных линий 6-10 кВ линейными разъединителями без отключения выключателя со стороны питания при зарядном токе линии не более:

- для 35 кВ – зарядного тока линии любой длины;
- 110 кВ – практически любой длины (140-150 км);
- 220 кВ – длиной до 250 км.

Разъединителем можно отключать также токи холостого хода.

Отключение одной из двух спаренных линий (отключается линия Л1), когда обе линии находятся в работе:

отключить выключатели В1, В2 обеих линий со стороны нагрузки;

отключить выключатель В3 спаренных линий со стороны питания;

отключить линейные разъединители РЛ1, РЛ3 с обеих сторон отключаемой линии Л1;

включить выключатель В3 спаренных линий со стороны питания;

включить выключатель В2 линии Л2, оставшейся в работе.

Последовательность операций при включении и отключении транзитной линии (рисунок 8.2)

При включении линии следует:

1. На подстанции А:

отключить заземляющие ножи РЗ1 с развилки шинных разъединителей РШ1, РШ2;

отключить заземляющие ножи РЗ2.

2. На подстанции Б:

отключить заземляющие ножи РЗ4 развилки шинных разъединителей РШ3, РШ4;

Отключение линии Л1 производят в следующем порядке:

1. На подстанции А:

отключить выключатель В1.

2. На подстанции Б:

отключить выключатель В2;

отключить линейный разъединитель РЛ2;

отключить шинный разъединитель РШ4 (или РШ3).

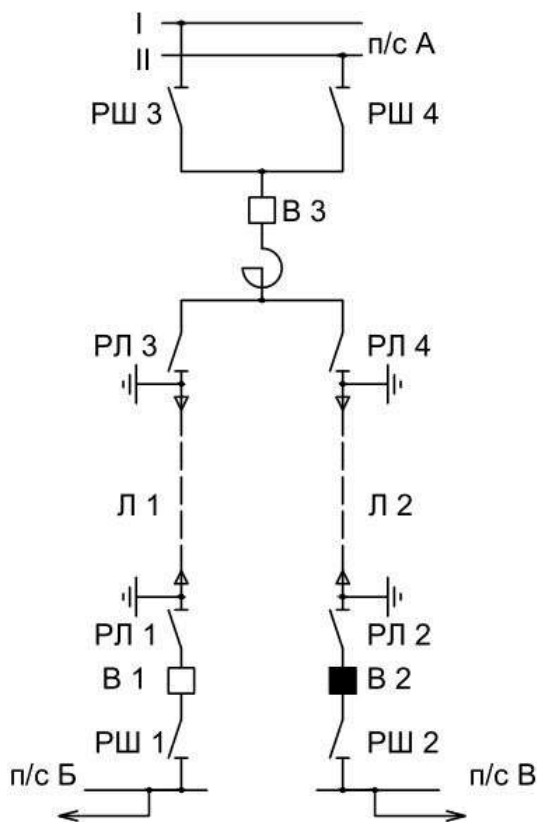


Рисунок 8.1 – Схема спаренных кабельных линий, находящихся в различных оперативных состояниях

- отключить заземляющие ножи РЗ3;
 - включить шинный разъединитель РШ4 (или РШ3) на соответствующую систему шин;
 - включить линейный разъединитель РЛ2.
3. На подстанции А:
- включить шинный разъединитель РШ2 или РШ1 на соответствующую систему шин;
 - включить линейный разъединитель РЛ1;
 - включить выключатель В1.

4. На подстанции Б:

включить выключатель В2.

3. На подстанции А:

отключить линейный разъединитель РЛ1;

отключить шинный разъединитель РШ2 (или РШ1);

проверить отсутствие напряжения на вводе линии Л1;

включить заземляющие ножи Р32 в сторону линии Л1;

проверить отсутствие напряжения на развилке шинных разъединителей РШ1 (или РШ2);

включить заземляющие ножи Р31 в сторону выключателя В1 линии Л1.

На подстанции Б:

проверить отсутствие напряжения на вводе линии Л1;

включить заземляющие ножи Р33 в сторону линии Л1;

проверить отсутствие напряжения на развилке шинных разъединителей РШ4 (или РШ3);

включить заземляющие ножи Р34 в сторону выключателя В2.

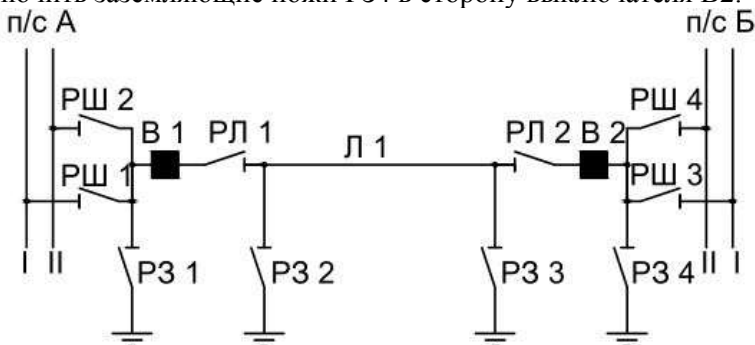


Рисунок 8.2 – Транзитная линия 110 кВ в отключенном состоянии

Последовательность операций при включении и отключении транзитной линии, с одной из сторон которой отсутствует выключатель (рисунок 8.3)

Для включения линии Л1 необходимо:

1. На подстанции Б:

отключить заземляющие ножи Р35 и Р32 линейного разъединителя РЛ2 со стороны линии.

2. На подстанции А:

отключить линейные заземляющие ножи РЗ1 линейного разъединителя РЛ1;

включить линейный разъединитель РЛ1 и шинный разъединитель РШ1, а затем включить выключатель В1 линии Л1 (линия Л1 опробуется напряжением);

проверить наличие напряжения на всех фазах ввода линии Л1;

отключить выключатель В1 линии Л1, проверить его положение и снять оперативный ток с привода и защиты выключателя В1.

3. На подстанции Б:

проверить отсутствие напряжения на вводе линии Л1;

включить линейный разъединитель РЛ2 линии Л1 – на линию Л1 подаётся напряжение.

4. На подстанции А:

подать оперативный ток на привод и защиту выключателя В1 и включить его (линия замыкается в транзит).

Отключение линии Л1.

1. На подстанции А:

отключить выключатель В1 и линейный разъединитель РЛ1 линии Л1, а также шинный разъединитель РШ1.

2. На подстанции Б:

отключить линейный разъединитель РЛ2 линии Л1;

включить линейные заземляющие ножи РЗ5 и РЗ2.

3. На подстанции А:

включить линейные заземляющие ножи РЗ1.

При включении и отключении линий дальних электропередач должны выполняться режимные мероприятия:

регулирование перетоков мощности по линиям;

отключение (включение) устройств системной автоматики;

изменение уставок срабатывания автоматических устройств.

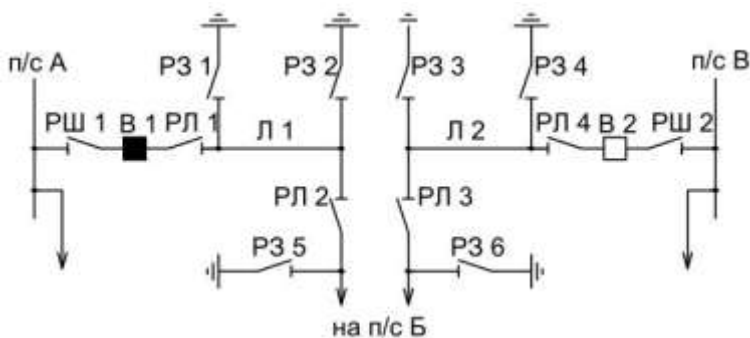


Рисунок 8.3 – Транзитная линия с одной из сторон которой отсутствует выключатель

Порядок выполнения работы

1. Изучить краткие теоретические сведения.
2. Запустить файл Scheme8.mdl в программе Matlab Simulink.
3. На макете схемы согласно инструкции произвести:
 - а) Последовательное включение (отключение) одной из двух спаренных линий (рисунок 1.3).
 - б) Последовательное включение (отключение) транзитной линии (рисунок 1.4).
 - в) Последовательное включение (отключение) транзитной линии с выключателем с одной стороны (рисунок 1.5).

Содержание отчёта

1. Цель работы и краткие теоретические сведения.
2. Схемы с тупиковыми, транзитными и спаренными линиями электропередачи.
3. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Что представляют собой тупиковые, транзитные, спаренные линии электропередачи?
2. Каков порядок включения (отключения) одной из двух спаренных линий?
3. Каков порядок включения (отключения) транзитных линий?
4. Какова последовательность операций при включении (отключении) транзитной линии с выключателем с одной стороны?

5. Назовите назначение разъединителей, заземляющих ножей, выключателей.

Литература

1. Васильев, А.А. Электрическая часть станций и подстанций / А.А. Васильев, Е.Ф. Крючков. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 551 с.
2. Инструкция по производству оперативных переключений в энергосистеме: утв. МЭ и Э СССР. – Минск: Белглавэнерго, 1990.
3. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. – 14-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
4. Электрические системы. Электрические сети / В.А. Веников [и др.]. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1998. – 511 с.
5. Электротехнический справочник: в 4 т.; под общ редакцией профессоров МЭИ. – 8-е изд., испр. и доп. – М.: издательство МЭИ, 2002. – 964 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ПЕРЕВОЗБУЖДЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Цель работы: Изучить теорию вопроса перевозбуждения трансформаторов и получить практические навыки расчёта и анализа перевозбуждения в процессе их эксплуатации.

Краткие теоретические сведения

Перевозбуждение трансформаторов (автотрансформаторов) связано с превышением значений индукции в стали трансформатора расчётных величин. Основной причиной, вызывающей недопустимое перевозбуждение трансформаторов, является превышение рабочего напряжения сверх номинального.

В зависимости от сорта стали трансформаторы рассчитываются на работу с индукцией 14-17 тысяч Гс. Такой индукции соответствует насыщение стали. Повышение подведенного напряжения к трансформатору вызывает резкое увеличение потерь на гистерезис в стали, соответственно тока холостого хода и высших гармоник в нём. Потери в стали увеличиваются пропорционально квадрату напряжения, ток и высшие гармоники в нём увеличиваются ещё в большей степени. Недопустимое увеличение потерь в стали может привести к перегреву и разрушению изоляции её листов и возникновению повышенных местных нагретов – до «пожара» стали. Нарастание высших гармоник тока холостого хода приводит к искажению формы и увеличению амплитудного значения кривой напряжения. Это явление может привести к повреждению обмоток высшего напряжения трансформаторов, а также создаёт дополнительные помехи на линиях связи.

Из-за трудности непосредственного измерения перевозбуждения трансформаторов предписывают осуществлять контроль превышения напряжения сверх номинального, поскольку эта величина и определяет перевозбуждение. Причём под номинальным током и напряжением подразумевают номинальные токи и напряжения от ветвлений, на которые включена обмотка трансформатора.

Так, на трансформаторах допускается повышение напряжения сверх номинального в следующих пределах:

а) длительно — на 5% при нагрузке не выше номинальной и на 10% при нагрузке не выше 0,25 номинальной;

б) кратковременно (до шести часов в сутки) — на 10% при нагрузке не выше номинальной;

в) в аварийных условиях – в соответствии с типовой инструкцией по эксплуатации трансформаторов.

Для трансформаторов, работающих в блоке с генераторами и автотрансформаторов без ответвлений в нейтрали и последовательных регулировочных (вольтодобавочных) трансформаторов допускается длительное повышение напряжения сверх номинального на 10% при нагрузке не выше номинальной.

Для автотрансформаторов с ответвлениями в нейтрали для регулирования напряжения или предназначенных для работы с последовательными регулировочными трансформаторами допустимое повышение напряжения определяется по данным завода-изготовителя.

Для того, чтобы в процессе эксплуатации трансформаторов в различных режимах работы избежать их недопустимого перевозбуждения, необходимо проводить проверочные расчёты.

Порядок расчётов следующий:

а) электрический расчёт режима трансформатора;

Рассчитывается потеря напряжения в трансформаторе по формуле

$$\Delta U = \frac{P_{\text{н}} r_{\text{т}} + Q_{\text{н}} x_{\text{т}}}{U_{\text{нт}}}, \quad (9.1)$$

где $U_{\text{нт}}$ – номинальное напряжение обмотки высшего напряжения трансформатора;

$r_{\text{т}}$ – активное сопротивление трансформатора;

$x_{\text{т}}$ – индуктивное сопротивление трансформатора;

$P_{\text{н}}$, $Q_{\text{н}}$ – активная и реактивная нагрузка соответственно.

Далее определяется напряжение на низшей стороне трансформатора, приведенное к высшему

$$U' = U - \Delta U, \quad (9.2)$$

где U – рабочее напряжение на высшей стороне трансформатора.

б) выбор ответвления трансформатора, обеспечивающего заданную величину напряжения на стороне низшего напряжения трансформатора;

Желаемое напряжение ответвления находится по формуле

$$U_{\text{ж}} = \frac{U'}{U_{\text{жн}}} U_{\text{нт}}, \quad (9.3)$$

где $U_{\text{жн}}$ – желаемое напряжения на низшей стороне;

$U_{\text{нт}}$ – номинальное напряжение трансформатора с низшей стороны.

Далее выбирается ближайшее стандартное напряжение ответвления.

в) анализ перевозбуждения и разработка при необходимости мероприятий по недопущению перевозбуждения трансформатора.

К таким мерам относятся: переключение ответвлений трансформатора (но при этом напряжение на низшей стороне трансформатора будет отличаться от желаемого); уменьшение загрузки трансформатора, например, за счёт переключения части мощности потребителей к другим трансформаторам; установка дополнительных компенсирующих устройств на шинах низшего напряжения подстанции или в сетях потребителей, питающихся от шин. При установке компенсирующих устройств, кроме того, в сети снижаются потери мощности и энергии.

Порядок выполнения работы

1. Изучить краткие теоретические сведения.
2. Выполнить расчёт перевозбуждения трансформаторов на понижительной подстанции для заданного преподавателем варианта (таблица 1.10).
3. Запустить файл Scheme9.mdl в программе Matlab Simulink.
4. На схеме задать значение сопротивление линии для указанного варианта. Для этого нужно открыть диалоговое окно элемента линии электропередачи ЛП1, в строке «Resistance R (Ohms)» вписать значение активного сопротивления в Ом, а индуктивное сопротивление задаётся в строке «Inductance L (H)» через индуктивность L в Гн.
5. Согласно своему варианту в диалоговом окне элемента источника напряжения U задать значение напряжения в строке «Phase-to-phase voltage (Vrms)».

6. По результатам расчётов задать напряжение высшей обмотки трансформатора. Для этого следует открыть диалоговое окно трансформатора, выбрать вкладку «Parameters», в строке «Winding 2 parameters [V2 Ph-Ph(Vrms), R2(Ohm), L2(H)]» первое число заменить на нужное напряжение.

7. Задать значения нагрузки в элементе «P-jQ». Это можно осуществить открытием диалогового окна элемента нагрузки и затем в строках «Active power P (W)» и «Inductive reactive Power QL (positive var)» записать значения потребляемой активной и реактивной мощности соответственно.

8. Запустить схему. Снять показания напряжения в измерительных блоках V2 и V3. Проанализировать возможность работы трансформатора в исследуемом режиме.

Содержание отчёта

1. Цель работы и краткие теоретические сведения.
2. Схема сети с указанием её параметров и параметров режима работы.
3. Результаты расчётов
4. Ответы на контрольные вопросы.

Таблица 9.1 – Варианты заданий на выполнение лабораторной работы

Номер варианта	Длина линии, км	Напряжение в начале линии, кВ	Мощность в начале линии, МВА	Желаемое напряжение на шинах низкого напряжения подстанции, кВ
1.	70	123	80-j40	11,0
2.	65	121	80-j50	10,0
3.	60	120	90-j40	10,8
4.	55	119	90-j50	10,8
5.	50	117	100-j50	10,7
6.	45	115	100-j60	10,7

Марка провода АС 240/32. Тип трансформатора на подстанции ТРДЦН-63000/110, номинальное напряжение обмоток 115/10,5, пределы регулирования $\pm 9 \times 1,78 \%$.

Контрольные вопросы

1. Поясните физическую сущность явления перевозбуждения трансформаторов и автотрансформаторов.
2. От чего зависит допустимое превышение номинального напряжения трансформаторов?
3. Каковы значения допустимых превышений номинальных напряжений трансформатора?
4. Каков порядок расчёта перевозбуждения трансформаторов и автотрансформаторов?
5. Как влияет значение мощности, протекающей через трансформатор, на его перевозбуждение?
6. Каковы меры по предотвращению перевозбуждения трансформаторов?

Литература

1. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. – 14-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

3. РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

1. Каков порядок измерения напряжения, тока, мощности в установленных и переходных режимах на виртуальной модели-тренажёре?
2. Назовите достоинства и недостатки электрической сети напряжением 6-35 кВ с изолированной нейтралью.
3. Как изменяется сила тока замыкания на землю при включении резистора в нейтраль сети напряжением 6-35 кВ?
4. Каковы недостатки сети, работающей с компенсированной нейтралью?
5. Изменяются ли места размыкания электрической сети, если в качестве основного критерия принять минимум потерь энергии?
6. Как выполняется плавка гололёда на проводах линий электропередачи?
7. Какими факторами может ограничиваться пропускная способность электрической сети?
8. Как выполняются коммутационные операции в энергосистемах?
9. Назовите мероприятия по предотвращению перевозбуждения трансформаторов.

4. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

1. Идельчик, В.И. Электрические системы и сети / В.И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
2. Короткевич, М.А. Режимы нейтрали городской электрической сети / М.А. Короткевич, Д. Л. Жив. – Минск: БелНИИагроэнерго, 1997. – 68 с.
3. Сирота, И.М. Режимы работы нейтрали электрических сетей / И.М. Сирота, С.Н. Кисиленко, А.М. Михайлов. – Киев: Наукова думка, 1985. – 264 с.
4. Короткевич, М.А. Эксплуатация электрических сетей / М.А. Короткевич. – Минск: Вышэйшая школа, 2014. – 350 с.
5. Короткевич М.А. Монтаж электрических сетей: Учебное пособие / М.А. Короткевич. – Минск: Вышэйшая школа, 2012. – 512 с.
6. Андриевский, В.Е. Эксплуатация воздушных линий электропередачи / В.Е. Андриевский, А.Т. Голованов, А.С. Зеличенко. – М.: Энергия, 1976. – 616 с.
7. Гурский, С.К. Оптимизация режимов энергосистем / С.К. Гурский, Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин. – Минск: БПИ, 1977. – 63 с.
8. Керного, В.В. Местные электрические сети / В.В. Керного, Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин. – Минск: Высшая школа, 1972. – 364 с.
9. Васильев, А.А. Электрическая часть станций и подстанций / А.А. Васильев, Е.Ф. Крючков. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 551 с.
10. Инструкция по производству оперативных переключений в энергосистеме: утв. МЭ и Э СССР. – Минск: Белглавэнерго, 1990.
11. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. – 14-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
12. Электрические системы. Электрические сети / В.А. Веников [и др.]. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1998. – 511 с.
13. Электротехнический справочник: в 4 т.; под общ редакцией профессоров МЭИ. – 8-е изд., испр. и доп. – М.: издательство МЭИ, 2002. – 964 с.
14. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. – 14-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
15. Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок: ТКП 427-2012 (02230). – Минск: Минэнерго РБ, 2012. - 82с.