



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Цифровые технологии и платформы
в электроэнергетике»

Учебное пособие

«Защита электрооборудования от перенапряжений»

Авторы
Синегубов А.П.,
Шелест В.А.

Ростов-на-Дону, 2023

Аннотация

В учебном пособии изложены сведения об особенностях внешней и внутренней изоляции электрооборудования, рассмотрены воздействия грозовых и внутренних перенапряжений на изоляцию электрооборудования и способы защиты от них.

Учебное пособие предназначено для студентов очной и заочной форм обучения направлений 13.04.02, и 13.03.02, «Электроэнергетика и электротехника».

Авторы



доцент, к.т.н.,
доцент кафедры «Цифровые
технологии и платформы в
электроэнергетике»
Синегубов А.П.



доцент, к.т.н.,
доцент кафедры «Цифровые
технологии и платформы в
электроэнергетике»
Шелест В.А.



Оглавление

Введение	5
1. Разряды в газах и электрические характеристики внешней изоляции электроустановок	8
1.1 Общая характеристика внешней изоляции.....	8
1.2 Виды ионизационных процессов в газовом разрядном промежутке	9
1.3 Механизм пробоя воздушной изоляции. Стримерная теория	11
1.4 Условие самостоятельности разряда.....	12
1.5 Характеристика степени однородности электрического поля.....	13
1.6. Разряд в воздушных промежутках при длительно воздействующих напряжениях (закон Пашена).....	14
1.7 Особенности развития разряда в неоднородном электрическом поле. Коронный разряд	15
1.8 Меры борьбы с короной на ЛЭП	16
1.9 Пробой газового промежутка при импульсном напряжении	17
2. Разряды в жидких и твёрдых диэлектриках и электрические характеристики внутренней изоляции электроустановок	20
2.1 Основные особенности внутренней изоляции.....	20
2.2 Методы регулирования электрических полей во внутренней изоляции	21
2.3 Основные характеристики трансформаторного масла	25
2.4 Повышение электрической прочности масляной изоляции	27
2.5 Изоляция из сшитого полиэтилена	29
2.6 Основные характеристики твердых диэлектриков	30
2.7 Частичные разряды в газовых включениях при переменном и постоянном напряжениях	31
2.8 Газовая изоляция, виды и особенности применения	33
2.9 Элегазовая изоляция	34
3. Методы испытаний изоляционных конструкций	38
3.1 Система контрольных испытаний изоляционных конструкций и методы испытаний	38
3.2 Схема замещения изоляции и её параметры	39

3.3 Методы профилактических испытаний изоляции	39
3.4 Измерение сопротивления изоляции	40
3.5 Диагностика состояния электрооборудования по характеристикам частичных разрядов	41
4. Грозовые перенапряжения в электрических системах и защита от них.....	46
4.1 Защита ЛЭП от прямых ударов молнии грозозащитными тросами	46
4.2 Рекомендуемые способы грозозащиты линий	46
4.3 Особенности грозозащиты подстанций	47
4.4 Разрядники и ограничители перенапряжения (ОПН) и их особенности	49
5. Внутренние перенапряжения в электрических системах и их ограничение	54
5.1 Общая характеристика внутренних перенапряжений	54
5.2 Повышение напряжения, обусловленное ёмкостным эффектом	58
5.3 Феррорезонансные явления в электрических установках	61
5.4 Коммутационные перенапряжения при включениях	63
5.5 Коммутационные перенапряжения при отключениях	65
5.6 Перенапряжения при однофазных замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью	68
Список литературы	72

ВВЕДЕНИЕ

Высокие напряжения играют огромную роль в электроэнергетике. Их применение высоких напряжений обусловлено, прежде всего, необходимостью снижения потерь при передаче электрической энергии на большие расстояния. Как известно, передаваемая активная мощность определяется выражением:

$$P = U * I * \cos \varphi,$$

т.е. для передачи заданной мощности необходимо соответствующее увеличение либо величины тока I , либо напряжения U линии электропередачи (ЛЭП).

В соответствии же с законом Джоуля – Ленца потери мощности в линии электропередач

$$\Delta P = I^2 R_{\text{л}}$$

пропорциональны квадрату тока и сопротивлению линии. Таким образом, при передаче больших мощностей экономичнее повышать рабочее напряжение ЛЭП, чем ток в линии.

Использование высоких напряжений требует решения сложных научно-технических проблем, среди которых выделяется комплекс вопросов, касающихся электрической изоляции. Общая цель - обеспечение безаварийной работы изоляции всех элементов электрической системы.

На протяжении всего срока службы изоляция находится под воздействием рабочего напряжения установки. Шкала напряжений представлена в таблице 1.

Таблица 1
Номинальные и наибольшие рабочие напряжения электрических систем

$U_{\text{ном}}$ кВ	3	6	10	20	35	110	150	220	330	500	750	1150
$U_{\text{раб. макс.}}$ кВ	При изолированной нейтрали					При заземлённой нейтрали						
	3,5	6,9	11,5	23	40,5	126	172	252	363	525	787,5	1200
$U_{\text{ф. макс}}$ кВ	2,0	4,0	6,65	13,3	23,4	72,8	100	146	210	304	445	695

Защита электрооборудования от перенапряжений

Примечания: Для $U_{\text{ном}} = 3-220 \text{ кВ}$ - $U_{\text{раб. макс.}} = 1,15 U_{\text{ном.}}$
Для $U_{\text{ном}} = 330 \text{ кВ}$ - $U_{\text{раб. макс.}} = 1,1 U_{\text{ном.}}$
Для $U_{\text{ном}} = 500-1150 \text{ кВ}$ - $U_{\text{раб макс.}} = 1,05 U_{\text{ном.}}$
 $U_{\text{ф. МАКС}} = U_{\text{РАБ. МАКС.}}/\sqrt{3}$.

На протяжении всего срока службы изоляция находится под воздействием *рабочего напряжения* установки, которое не должно превышать рабочего максимального напряжения $U_{\text{раб. макс.}}$ (см. таблицу 1)

Однако требования к изоляции определяются не только рабочим напряжением. В эксплуатации возникают и перенапряжения - грозовые (или атмосферные) и внутренние.

Грозовые перенапряжения возникают при поражениях молнией электроустановок. При ударе молнии в объект возникают перенапряжения длительностью 50-100 мкс, амплитуда которых определяется параметрами молнии - амплитудой тока и максимальной крутизной фронта (или одним из них).

Внутренние перенапряжения зависят как от вида коммутации, так и от параметров сети, характеристик выключателя или другого аппарата и ряда других факторов.

Все виды перенапряжений носят *статистический (случайный) характер*.

Защита от грозовых перенапряжений осуществляется молниеотводами, тросами (протяжённые молниеотводы), разрядниками и ограничителями перенапряжений (ОПН).

Внутренние перенапряжения могут в 3-3,5 раза превышать фазное напряжение установки. Как правило, изоляция установок до 220 кВ включительно такое перенапряжение выдерживает. При более высоких номинальных напряжениях, когда экономически целесообразно создавать такие большие запасы электрической прочности изоляции, перенапряжения ограничивают, в частности, специальными разрядниками и ОПН.

Изоляция электроустановок разделяется на *внешнюю и внутреннюю*. *Внешняя* - изоляционные промежутки между электродами (проводами ЛЭП, шинами распределительных устройства (РУ) и т. п.), в которых роль основного диэлектрика играет воздух и части изоляционных конструкций, которые соприкасаются с воздухом. *Внутренняя* - находится внутри корпуса трансформатора или аппарата, кабельной оболочки и т.д. Она состоит из комбинации различных жидких, твёрдых и газообразных диэлектриков.

После пробоя воздушного промежутка или перекрытия по поверхности изолятора и устранения причины пробоя электрическая прочность воздуха полностью восстанавливается.

Защита электрооборудования от перенапряжений

Нежелательные последствия пробоя - возникновение дуги. На линиях электропередачи (ЛЭП) это приводит к отключению линии и её автоматическому повторному включению (АПВ). Таким образом, пробой воздушной изоляции вызывает кратковременное отключение ЛЭП, почти незаметное для потребителя, а не повреждение изоляции.

Нарушение же электрической прочности внутренней изоляции - необратимый процесс, ведущий к выходу из строя дорогостоящей аппаратуры и длительному отключению установки для ремонта.

Оценка возможных перенапряжений, выбор защитных средств и изоляционных конструкций - все эти вопросы тесно связаны между собой. Комплексное решение этих вопросов, т. е. согласование характеристик защитных устройств и характеристик изоляции, обеспечивающее высокую надёжность работы изоляции, называется *координацией изоляции*.

1. РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВНЕШНЕЙ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

1.1 Общая характеристика внешней изоляции

Целесообразность использования диэлектрических свойств воздуха в энергетических установках разных классов напряжения объясняется малой стоимостью и сравнительной простотой создания изоляции, а также способностью воздушной изоляции полностью восстанавливать электрическую прочность после устранения причины пробоя разрядного промежутка. Атмосферный воздух не подвержен старению, т.е. независимо от воздействующих на изоляцию напряжений и режимов работы оборудования его средние характеристики остаются неизменными во времени.

Электрическая прочность воздуха при нормальных условиях относительно невелика: при расстояниях между электродами более 1 см она не превосходит 25-30 кВ/см, (в 10-30 раз меньше, чем у твердых диэлектриков). Электрическая прочность внешней изоляции в значительной степени зависит от формы электродов, расстояния между электродами, от метеорологических условий, определяющих состояние основного диэлектрика - воздуха, а также поверхности изоляторов (влага, загрязнения и т. п.).

На разрядное напряжение чисто воздушных промежутков и вдоль поверхности изоляторов *внутренней* установки оказывают влияние давление P и температура T , а также абсолютная влажность H , а на разрядные напряжения изоляторов *наружной* установки - кроме того, вид и интенсивность атмосферных осадков, количество и состав загрязнений в атмосфере и ветровые условия.

Смена метеоусловий может качественно изменить состояние поверхностей изоляторов наружной установки и механизм развития разряда вдоль их поверхности, а этим изменить разрядные напряжения. В связи с этим при испытаниях изоляторов определяют *сухоразрядное*, *мокроразрядное* и *грязе- или влагоразрядное напряжения*.

Отдельные районы классифицируются по степени загрязнения атмосферы (предприятия, солончаковые почвы, морское побережье, полотно железной дороги), а внешняя изоляция оборудования проектируется для этих зон или районов с учётом их особенностей.

1.2 Виды ионизационных процессов в газовом разрядном промежутке

Нарушение электрической прочности промежутка происходит под действием *ударной ионизации* электронами (рис. 1.1).

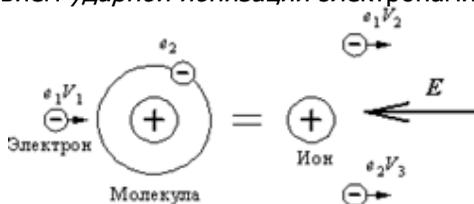


Рис. 1.1. Ударная ионизация

Для ионизации электроном нейтральной частицы энергия, приобретаемая им при движении в электрическом поле напряжённостью E на пути x , должна быть больше энергии ионизации газа $W_{и}$

$$W = Eex = mV^2/2 \geq W_{и},$$

или в другой форме:

$$Ex \geq U_{и},$$

где e - заряд электрона; m – масса заряженной частицы; V – скорость дрейфа частицы; $U_{и}$ - потенциал ионизации газа, В.

Однако не только за счёт ударной ионизации в газовом промежутке возникают ионы и электроны. Есть и другие источники заряженных частиц.

Фотоионизация - ионизация в результате поглощения молекулой квантов лучистой энергии т.е. фотонов.

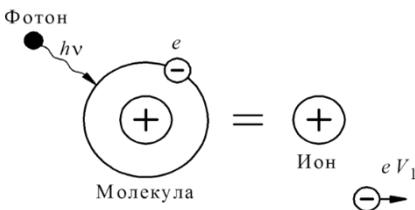


Рис. 1.2. Фотоионизация

Энергия фотона

$$W_{\Phi} = h\nu,$$

где ν - частота излучения, $1/c$; h - постоянная Планка, равная $4,13 \cdot 10^{-8}$ эВ*с.

Условия ионизации и возбуждения выражаются формулами:

$$hU_{и} \geq W_{и} \quad \text{и} \quad hU_{в} \geq W_{в}$$

Как видно из формулы, повышение частоты увеличивает способность фотона к ионизации. Наибольшей ионизирующей способностью обладают космические лучи, γ - излучение радиоактивного распада, рентгеновские и ультрафиолетовые лучи.

Термоионизация. Температура есть мера кинетической энергии хаотического (теплого) движения молекул и свободных электронов в газе. Величина этой энергии определяется для молекулы выражением

$$W = 3/2 * k * T,$$

где k - постоянная Больцмана, равная $0,86 \cdot 10^{-4} \text{эВ/}^\circ\text{K}$; T - температура, $^\circ\text{K}$.

Очевидно, что при достаточно высокой температуре становится возможной ионизация в результате столкновения электронов с молекулами.

Процесс термоионизации играет решающую роль в столбе электрической дуги, температура которого составляет от 4000 до 15000 $^\circ\text{K}$.

Поверхностная ионизация - это эффект испускания из электродов свободных электронов. Для выхода из металла (преодоления потенциального барьера) электроны должны получить энергию, достаточную для выхода (энергия поверхностной ионизации). Эта энергия для всех металлов значительно ниже энергии ионизации и возбуждения молекул газов. Поверхностная ионизация может иметь различные формы:

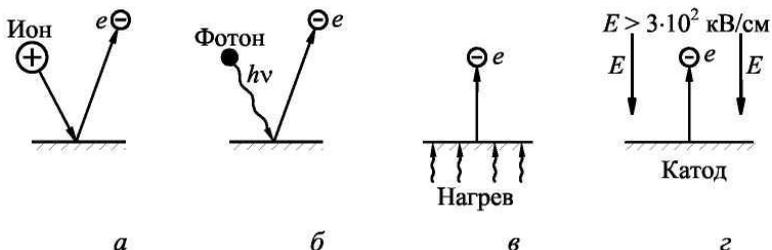


Рис. 1.3. Виды поверхностной ионизации: а -поверхностная ударная ионизация; б — фотоэлектронная эмиссия; в — термоионизация; г — автоэлектронная эмиссия

-*поверхностная ударная ионизация* происходит под действием бомбардировки поверхности катода положительными ионами, ускоренными в электрическом поле (рис. 1.3,а);

-*поверхностная фотоионизация (фотоэлектронная эмиссия)* происходит при падении на поверхность катода фотонов достаточной энергии (рис. 1.3,б);

-*термическая эмиссия электронов* из катода - происходит за счёт нагрева (широко применяется в электронных лампах) (рис.1.3,в);

-*автоэлектронная эмиссия* заключается в том, что электроны под действием сил электрического поля вырываются из катода. Это возможно, если напряжённость поля вблизи катода составляет порядка 10^6 В/см (рис. 1.3,г).

Наряду с процессами ионизации в газовом промежутке происходит *рекомбинация* - взаимная компенсация зарядов частиц. Возможны различные виды рекомбинации: электронно – ионная, ионная. В результате рекомбинации выделяется энергия в виде фотонов, которые также могут создавать вторичные электроны.

1.3 Механизм пробоя воздушной изоляции.

Стримерная теория

В воздухе обычно имеется некоторое количество свободных ионов и электронов, создаваемых внешними ионизаторами различного вида (космические частицы, радиоактивное излучение земли, ультрафиолетовое излучение солнца).

Под воздействием электрического поля в промежутке между электродами электрон приобретает большую скорость. При столкновении нейтральной молекулы или атома с движущейся частицей может произойти ударная ионизация (см. рис. 1.1).

Электроны и ионы, образовавшиеся в лавине, под действием электрического поля перемещаются. Электроны (более быстрые) смещаются к головке лавины, а тяжёлые положительные ионы за время развития лавины смещаются незначительно. В результате в головке лавины образуется избыток электронов, а в её хвосте преобладают положительные ионы.

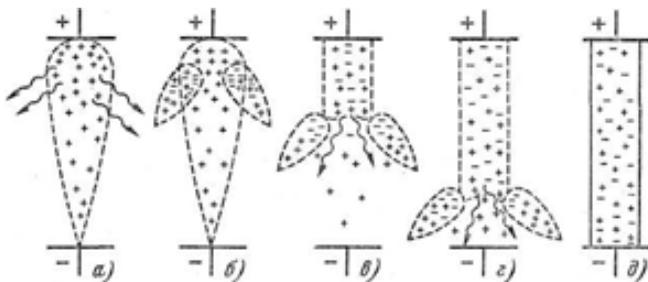


Рис.1.4. Возникновение и развитие анодного стримера

Начальная лавина после пересечения всего промежутка оставляет положительный объёмный заряд, сосредоточенный, в основном, возле анода (рис.1.4,а). За счёт излучения начальной лавины в её окрестностях создаётся некоторое число вторичных электронов, которые дают начало новым вторичным лавинам (рис.1.4,б). Последние втягиваются в положительный объёмный заряд. Электроны вторичных лавин вместе с положительными ионами начальной лавины образуют канал, заполненный плазмой, - стример (рис. 1.4,в). Канал стримера является проводящим и имеет около головки избыточный положительный заряд от вторичных лавин. Поэтому он представляет собой как бы выступ на поверхности анода, напряжённость поля около которого сильно возрастает. Это способствует образованию новых лавин, развивающихся по направлению к головке стримера.

Новые лавины превращают избыточный объёмный заряд в плазму, и канал стримера удлиняется (рис. 1.4,г). Постепенно расширяясь к катоду, стример перекрывает весь промежуток, и происходит пробой, т.е. между электродами образуется сквозной проводящий канал (рис.1.4,д). Это *главный разряд*.

1.4 Условие самостоятельности разряда

Свободные первичные электроны дают начало лавине электронов. После достижения лавиной анода процесс может прекратиться, особенно при небольшой длине промежутка.

Для поддержания лавинного процесса должен появиться хотя бы один вторичный эффективный электрон, вызывающий появление новых лавин. Такой электрон может образоваться вновь в результате действия внешнего ионизатора, в этом случае разряд называется *несамостоятельным*. Если же вторичный эффективный электрон возникает даже в отсутствие внешнего ионизатора, разряд называется *самостоятельным*.

При самостоятельной форме разряда лавинный процесс возобновляется, поскольку сама первичная лавина создает условия для его возобновления:

1) оставшиеся после прохождения лавины положительные ионы, двигаясь к катоду, бомбардируют его и вызывают эмиссию электронов из катода;

2) возбужденные атомы и молекулы, образуемые наряду с ионизацией, испускают фотоны, которые могут приводить как к фотоионизации в объеме промежутка, так и к фотоэмиссии электронов из катода.

Образующиеся таким образом вторичные электроны приводят снова к образованию лавин в разрядном промежутке.

Напряжение, при котором в промежутке выполняется условие самостоятельности разряда, называют *начальным напряжением*.

Для изоляционного промежутка с однородным электрическим полем выполнение условия самостоятельности разряда означает пробой промежутка.

1.5 Характеристика степени однородности электрического поля

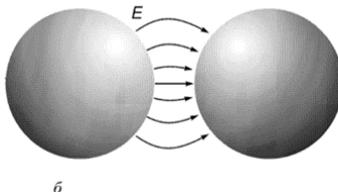
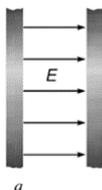
По степени однородности электрического поля, зависящей от формы электродов, различают два вида изоляционных промежутков:

- изоляционные промежутки с однородным и слабонеодородным электрическим полем (СНП);
- изоляционные промежутки с резконеодородным электрическим полем (РНП).

Количественной характеристикой степени однородности поля является *коэффициент неоднородности*

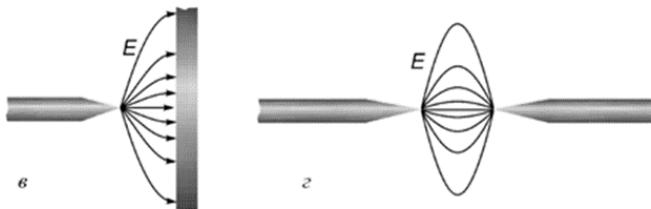
$$k_n = E_{max} / E_{cp},$$

где E_{max} , E_{cp} - максимальное и среднее значение напряженности электрического поля в изоляционном промежутке, соответственно.



- Рис. 1.5. Промежутки с однородным и СНП ($k_n < 2$):
- однородное (плоскость - плоскость с закругленными краями);
 - слабонеоднородное (шар - шар, если радиусы шаров больше расстояния между их поверхностями).

Промежутки с РНП ($k_n > 3..4$):



- Рис. 1.6. Промежутки с РНП ($k_n > 3..4$):
- игла - плоскость;
 - игла - игла.

1.6. Разряд в воздушных промежутках при длительно воздействующих напряжениях (закон Пашена)

Закон Пашена определяет зависимость пробивного напряжения газового промежутка с однородным (ОП) и слабонеоднородным (СНП) электрическим полем от произведения давления P и расстояния между электродами S : $U_{пр} = f(PS)$.

$U_{пр}$ растёт с увеличением или уменьшением произведения $P \cdot S$ по отношению минимуму. Если в какой-либо точке кривой P и S изменяются, но их произведение остается постоянным, то $U_{пр}$ будет постоянным. В этом заключается *правило подобия* разрядов в промежутках.

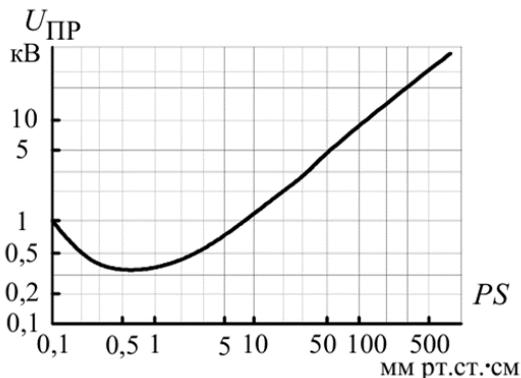


Рис. 1.7. Зависимость величины пробивного напряжения от произведения PS

При $S = const$ с ростом давления (плотности) газа возрастает число столкновений электрона, но снижается средняя длина свободного пробега λ , и, следовательно, энергия электрона при столкновении недостаточна для ионизации, прочность промежутка растёт (участок кривой вправо от минимума). При снижении давления (участок кривой влево от минимума) средняя длина свободного пробега увеличивается, электроны приобретают энергию достаточную для ионизации, но снижается число столкновений. Для выполнения условия самостоятельности разряда необходимо, чтобы электрон при соударениях выбивал из молекулы сразу 2-3 электрона. Но для этого потребуются энергия непропорционально большая чем энергия двух - трёх ионизаций. Поэтому кривая на участке малых давлений круче, чем вправо от минимума.

1.7 Особенности развития разряда в неоднородном электрическом поле. Коронный разряд

Большинство высоковольтных конструкций имеет острые края, заусеницы, резкие переходы одного размера в другой. Разрядные напряжения таких мест в значительной степени приближаются к разрядному напряжению несимметричных электродов типа «игла-плоскость». В неоднородном поле, в отличие от однородного, напряженность поля в различных точках промежутка разная по величине (рис. 1.8).

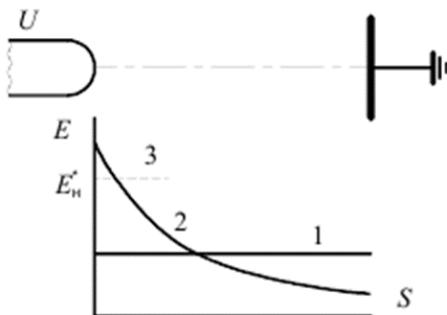


Рис. 1.8 Зависимость напряженности электрического поля от расстояния между электродами $E = f(S)$ - 2; 1 – среднее значение напряжённости E_{cp} ; 3 – E'_n - напряженность возникновения самостоятельной формы разряда

В резко неоднородном электрическом поле условие самостоятельности разряда выполняется в очень узкой зоне вблизи «острого» электрода. Это означает, что ионизационные процессы концентрируются в этой зоне и создают характерное свечение, называемое коронным разрядом или короной. В резко неоднородном

электрическом поле начальное напряжение соответствует напряжению возникновения коронного разряда. Для пробоя всего межэлектродного промежутка необходимо еще увеличить напряжение.

1.8 Меры борьбы с короной на ЛЭП

Электрическое поле между проводами ЛЭП резконеоднородное. Вблизи проводов напряжённость поля максимальная и поэтому в их окрестности возникает коронный разряд. Ионизационные процессы охватывают узкую зону вокруг провода, называемую чехлом короны. В чехле короны создаются ионы обоих знаков.

Движение этого заряда под действием электрического поля между проводами создаёт ток короны, который может иметь значительную величину. Он создаёт потери энергии, соизмеримые с потерями в активных сопротивлениях проводов под действием рабочего тока. Например, на линии сверхвысокого напряжения потери энергии при коронировании в плохую погоду составляют 100...200 кВт на километр линии.

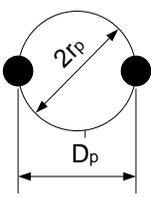
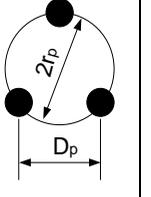
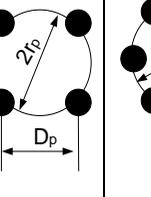
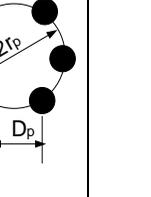
Для чехла короны характерны быстрые процессы, со скоростью электронов или стримеров. Поэтому ток короны содержит кроме постоянной составляющей большое количество кратковременных пиков, соответствующих развитию стримеров или групп ла-

вин. Эта высокочастотная составляющая тока короны является источником интенсивного электромагнитного излучения с широким спектром частот, соответствующим радиотехническому диапазону. Возникают *помехи радиоприёму* (особенно вблизи коронирующей линии).

Таким образом, появление коронного разряда сопровождается потерями энергии и радиопомехами. Поэтому требование ограничения потерь энергии и радиопомех в значительной мере влияет на конструкцию проводов и арматуру ЛЭП, особенно при наивысших классах напряжения.

Основной мерой борьбы с короной является увеличение радиуса провода. Однако, при очень высоких номинальных напряжениях пришлось бы применять провода чрезмерно большого диаметра, превышающего диаметр, выбранный по условию передачи заданной мощности. Для исключения влияния номинального напряжения ЛЭП на выбор диаметра провода в России применяют *расщеплённые* провода. Вместо одного провода большого диаметра в фазе применяют несколько параллельных проводов относительно малого диаметра, находящихся друг от друга на расстоянии нескольких десятков сантиметров. Это эквивалентно увеличению радиуса провода до величины r_3 .

Таблица 1.1
 Эквивалентные радиусы для некоторых типов
 расщеплённых проводов

Характеристика провода	Эскиз расщепленного провода			
				
Число проводов в фазе	2	3	4	6
Радиус расщепления r_p	$\frac{D_p}{2}$	$\frac{D_p}{\sqrt{3}}$	$\frac{\sqrt{2}}{2} D_p$	D_p
Эквивалентный радиус $r_э$	$\sqrt{r D_p}$	$\sqrt[3]{r D_p^2}$	$\sqrt[8]{2} \sqrt[4]{r D_p^3}$	$\sqrt[6]{6} \sqrt{r D_p^5}$

1.9 Пробой газового промежутка при импульсном напряжении

Важнейшей характеристикой изоляции является её импульсная прочность. Импульсная прочность большинства объектов (воздушных промежутков, изоляторов и др.) зависит от формы импульса, поэтому для того, чтобы можно было сравнивать различные изоляционные конструкции, результаты испытаний и т.д., форма кривой импульса стандартизирована (рис 1.9).

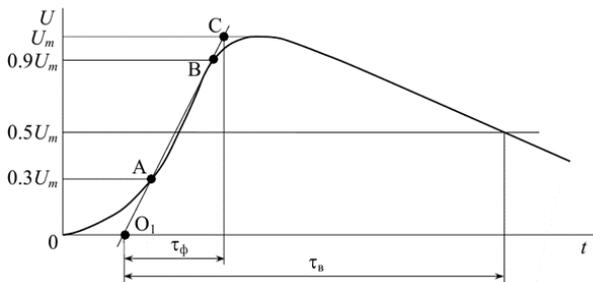


Рис. 1.9 Полный грозовой импульс

За значение испытательного напряжения полного импульса принимают максимальное значение напряжения импульса. Стандартный полный грозовой импульс должен иметь следующие параметры:

- длительность фронта $t_{\phi} = (1,2 \pm 0,36)$ мкс;
- длительность импульса $t_{\text{в}} = (50 \pm 10)$ мкс.

Обозначение импульса: 1,2/50.

При воздействии на изоляцию импульсного напряжения разряд происходит при напряжениях более высоких, чем при постоянном или амплитуде переменного напряжения низкой частоты, т.е. длительно приложенном напряжении.

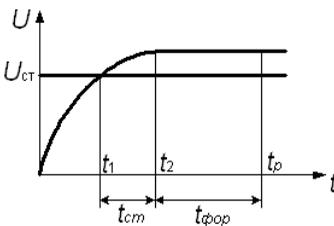


Рис. 1.10 Составляющие времени разряда

Разрядное напряжение при достаточно длительном его приложении называют *статическим разрядным напряжением* $U_{\text{ст}}$. Рассмотрим составляющие времени разряда. Если $U_{\text{ст}}$ (рис. 1.10) – напряжение, при котором может произойти разряд, то до момента t_1 разряд произойти не может.

Более того, в момент времени t_1 разряд может не начаться, так как для развития разряда вблизи катода должен находиться хотя бы один «эффективный» электрон, т.е. электрон, способный создать начальную лавину.

Появление этого электрона носит статистический характер (зависит от внешних ионизаторов, формы электродов, их чистоты и степени обработки, бомбардировки катода положительными ионами и др.). Таким образом, развитие разряда начнется не в момент времени t_1 , а в момент

$$t_2 = t_1 + t_{\text{ст}},$$

где $t_{\text{ст}}$ – статистическое время запаздывания разряда (время ожидания эффективного электрона).

Но в момент времени $t_1 + t_{\text{ст}}$ разряд только начнет развиваться. Должно пройти еще некоторое время формирования разряда $t_{\text{фоп}}$, прежде чем разряд завершится. Время формирования разряда состоит из времени образования лавины $t_{\text{л}}$, времени образования стримера $t_{\text{стр}}$ и времени образования главного разряда $t_{\text{лр}}$. Поскольку $t_{\text{стр}}$ и $t_{\text{лр}}$ значительно меньше времени лавинной стадии разряда, ими можно пренебречь. Таким образом, время разряда состоит из трех слагаемых:

$$t_p = t_l + t_{ct} + t_n.$$

Сумму $t_{ct} + t_n$ часто называют временем запаздывания заряда.

Статистическое время запаздывания разряда в однородном и квазиоднородном полях практически равно нулю, так как весьма велика вероятность наличия свободного электрона вблизи электрода больших размеров. Для любого поля статистическое время запаздывания разряда может быть сведено к нулю облучением катода жесткими лучами, что и применяется в лабораторной практике при измерении амплитуд импульсов шаровыми разрядниками.

Составляющие времени разряда t_{ct} и $t_{фор}$ зависят от значения напряжения на промежутке. При увеличении напряжения повышается вероятность того, что появляющиеся в промежутке электроны станут эффективными и t_{ct} уменьшается. Сокращается также и $t_{фор}$, поскольку при большем напряжении возрастает интенсивность разрядных процессов и скорость продвижения канала разряда в промежутке. Поэтому чем выше приложенное напряжение, тем меньше время разряда.

Зависимость амплитуды напряжения разряда от времени действия импульса называется вольт-секундной характеристикой изоляции. Из-за сложности получения вольт-секундных характеристик часто пользуются более простым пятидесятипроцентным пробивным напряжением $U_{50\%}$, под которым понимают амплитуду такого стандартного грозового импульса, при которой из десяти поданных на промежутки импульсов пять приводят к пробое промежутка, а оставшиеся пять - нет.

2 РАЗЯДЫ В ЖИДКИХ И ТВЁРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

2.1 Основные особенности внутренней изоляции

Внутренней изоляцией называют те элементы электрической изоляции, в которых изоляционные промежутки заполнены газообразными, жидкими или твердыми диэлектрическими материалами или их комбинациями, но не атмосферным воздухом.

Особенности внутренней изоляции:

1. На внутреннюю изоляцию не оказывают влияния кратковременные изменения атмосферных условий. На поведение внутренней изоляции ощутимо влияют лишь средние значения температуры и влажности окружающего воздуха за длительные промежутки времени.

2. Пробой диэлектриков, составляющих внутреннюю изоляцию, является необратимым явлением. После пробоя необходим капитальный ремонт или вообще замена изоляции. Поэтому внутренняя изоляция должна иметь большие запасы прочности, чем внешняя.

3. Электрическая прочность внутренней изоляции зависит от времени воздействия напряжения. Эта зависимость имеет пять характерных областей, показанных на рис.2.1.

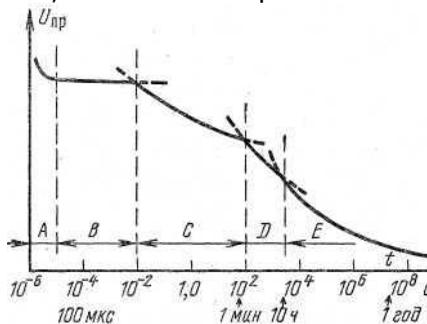


Рис.2.1 Зависимость пробивного напряжения внутренней изоляции

В области малых времён (мкс) - чисто электрический пробой; зависимость аналогична ВСХ чисто газовой изоляции (область А).

При временах порядка десятков тысяч мкс (область В) пробивное напряжение $U_{пр}$ остаётся почти неизменным, т.к. время

электрического пробоя значительно меньше, а механические и химические процессы не успевают развиваться. В интервале времён от 0,01с до 1мин (область С) происходят снижение $U_{пр}$, особенно при наличии жидких диэлектриков, связанное с образованием проводящих мостиков из примесей и другими медленными процессами.

При временах от 1 мин. до нескольких часов (область D) может возникнуть тепловой пробой или скажется электрическое старение. При временах более 10 ч. (область E) происходит медленное снижение $U_{пр}$ - из-за старения изоляции вследствие влияния внешних электрических, тепловых и механических воздействий.

В связи с этим для внутренней изоляции различают:

- кратковременную электрическую прочность, которая в свою очередь подразделяется на эл. прочность при грозовых (время воздействия от единиц до 1000 мкс) и внутренних (от единиц миллисекунд до нескольких секунд) перенапряжениях;
- длительную электрическую прочность, которая соответствует временам воздействия от нескольких часов до полного срока служба (25-30 лет и более – область E).

Электрическая прочность внутренней изоляции имеет значительно большие разбросы, чем внешняя. Тем не менее, надо быть уверенным в том, что изоляция имеет прочность не ниже определённой величины. Поэтому изоляция должна иметь большие запасы прочности, чем внешняя и она подвергается действию испытательных напряжений, параметры которых устанавливаются стандартами.

2.2 Методы регулирования электрических полей во внутренней изоляции

Электрические поля во внутренней изоляции обычно получаются неоднородными. Такие поля характеризуются отношением $K_n = E_{\max}/E_{\text{ср}}$, которое называют *коэффициентом неоднородности эл. поля*.

В *слабонеоднородном* поле ($K_n < 3,0$) разрядный процесс, возникший в области наибольших напряжённостей, развивается в глубь изоляционного промежутка и может привести к сквозному пробую или значительному повреждению изоляции. Поэтому для нормальной работы изоляционной конструкции должно соблюдаться условие

$$E_{\max} \leq E_{\text{доп}} \quad \text{или} \quad K_n \cdot E_{\text{ср}} \leq E_{\text{доп}}, \quad (2.1)$$

где $E_{\text{доп}}$ - допустимая напряженность, соответствующая отсутствию разрядных процессов в изоляции при данном виде воздействующего напряжения $U_{\text{возд}}$ (импульсном, одноминутном испытательном, рабочем).

Из этого условия следует, что толщина изоляции d должна быть

$$d \geq (U_{\text{возд}}/E_{\text{доп}}) * K_n,$$

т.е. в K_n раз больше, чем в однородном поле.

В *резконеоднородных электрических полях* ($K_n > 3$) принципиально допустимы разрядные процессы в малых объемах изоляции при условии, что выделяемая при этом энергия недостаточна для разрушения изоляции.

Для снижения степени неоднородности поля (уменьшения K_n) или уменьшения областей с особенно большими напряжённостями поля применяется *регулирование* электрических полей. Регулирование полей позволяет уменьшить толщину изоляции при сохранении её эл. прочности. В зависимости от конструкции и технологии изготовления изоляции применяют различные способы регулирования.

1. *Скругление краев электродов* (рис.2.2). При отсутствии скругления острые края электродов имеют очень малый радиус кривизны и K_n достигает 5..10, т. е. поле резконеоднородное. При радиусе скругления $r > 0,5 * S$ - поле слабонеоднородное, а при $r/S > 1,0$ - K_n не превышает 1,3; где S - расстояние между электродами.

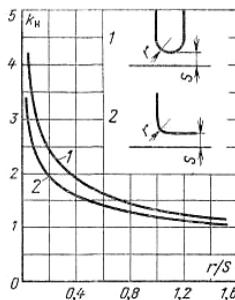


Рис. 2.2 Зависимость K_n от соотношения R/S

2. *Полупроводящие покрытия*. В тех случаях, когда электрод с острой кромкой находится в газе или жидкости и примыкает к поверхности твердой изоляции (рис.2.3). Если щель по технологическим причинам нельзя заполнить твердой изоляцией или если скругление края электрода усложняет конструкцию, используют полупроводящие покрытия.

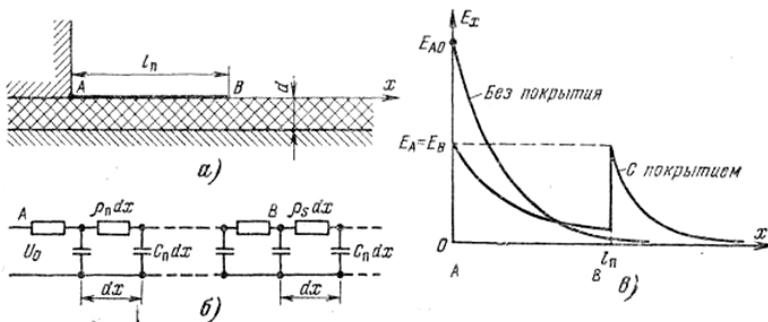


Рис. 2.3 Регулирование электрического поля с помощью полупроводящего покрытия

- а – устройство изоляции (на участке АВ – покрытие);
 б – схема замещения; в – изменение напряженности вдоль поверхности твердой изоляции

При отсутствии покрытия изменение потенциала и напряженности E_x вдоль поверхности твердой изоляции определяется главным образом удельным поверхностным сопротивлением твердой изоляции ρ_s , и удельной поверхностной емкостью $C_{пов} = \varepsilon\varepsilon_0/d$, где ε и d соответственно диэлектрическая проницаемость и толщина твердой изоляции. Наибольшее значение напряженности E_x имеет в точке А:

$$E_{A0} = U_0 * \sqrt{\omega\rho_s\varepsilon_0\varepsilon/d} \quad (2.2)$$

При наличии полупроводящего покрытия с удельным поверхностным сопротивлением $\rho_{п}$ напряженности в точке А становится равной

$$E_{АП} \approx U_0 * \sqrt{\omega\rho_{п}\varepsilon_0\varepsilon/d}, \quad (2.3)$$

т. е. уменьшается в $\sqrt{\rho_s/\rho_{п}}$ раз.

Конец покрытия образует острую кромку, поэтому на участке $x > l_n$ напряженности E_x увеличивается. Вследствие падения напряжения в полупроводящем покрытии $U_B < U_0$, поэтому и $E_B < E_{A0}$. Длину покрытия l_n и $\rho_{п}$ можно подобрать так, чтобы $E_{АП} = E_B \leq E_{доп}$, где $E_{доп}$ - допустимая напряженности, соответствующая отсутствию разрядов по поверхности твердой изоляции.

3. *Дополнительные электроды.* Такой способ регулирования эл. поля у острого края электрода наиболее удобен в случае многослойной изоляции (бумажнопропитанной, маслобарьерной).

Рассмотрим

элемент изоляции с плоскими основными электродами (1), показанный на рис.2.4. Допустимое напряжение для него ограничивается условием отсутствия разрядов у острого края верхнего электрода.

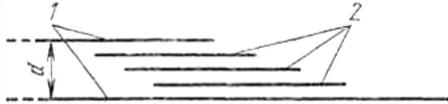


Рис. 2.4 Регулирование электрического поля у края электрода в плоской изоляции с помощью дополнительных электродов
1 – основные электроды;
2 – дополнительные электроды

Для изоляции без дополнительных электродов

$$U_{\text{доп. о}} = K * d^{0.5}, \quad (2.4)$$

где $K = E_{\text{доп}} / \sqrt{(\omega \rho_s \varepsilon_o \varepsilon)}$.

С помощью n дополнительных электродов изоляция разбивается на $n + 1$ слоёв одинаковой толщины, для каждого из которых

$$U_{\text{доп. сл}} = K (d/(n + 1))^{0.5}.$$

Предположим, что напряжение распределяется по слоям равномерно. Тогда допустимое напряжение для изоляции с n дополнительными электродами будет:

$$U_{\text{доп. рег.}} = (n + 1) U_{\text{доп. сл.}} = (n + 1)^{0.5} K d^{0.5},$$

т. е. увеличивается в $(n + 1)^{0.5}$ раз.

Такая конструкция (рис.2.4) называется *конденсаторной разделкой края электрода*.

Дополнительные электроды широко используются для регулирования электрических полей в проходных изоляторах и кабельных муфтах.

4. *Градирирование изоляции* применяется, как правило, в изоляционных конструкциях с электродами в виде соосных цилиндров, например, в кабелях ВН, и позволяет выравнять эл. поле в радиальном направлении. Регулирование поля достигается за счёт изменения диэлектрической проницаемости слоев изоляции (рис.2.5).

В силу симметрии электрического поля и теоремы Гаусса

$$2\pi r_1 \varepsilon_0 \varepsilon_1 E_{\text{макс1}} = 2\pi r_2 \varepsilon_0 \varepsilon_2 E_{\text{макс2}} = \dots \quad (2.5)$$

где $E_{\max 1}$, $E_{\max 2}$ - наибольшие напряжённости в соответствующих слоях изоляции.

Из (2.5) следует, что при условии $r_1 \varepsilon_1 = r_2 \varepsilon_2 = \dots$ достигается равенство $E_{\max 1} = E_{\max 2} = \dots$

При этом, как видно из рис. 2.5, неоднородность поля уменьшается. Все рассмотренные способы регулирования применяются для изоляции, работающей при переменном напряжении, а некоторые, например, скругленные электроды, и при постоянном напряжении. При выборе средств регулирования полей в изоляции оборудования постоянного тока необходимо учитывать особенности распределения эл. полей при постоянном напряжении. В этом случае картина поля определяется удельными сопротивлениями, которые в реальной изоляции могут быть различными в разных направлениях (например, вдоль или поперёк слоев), и, главное, сильно зависят от температуры.

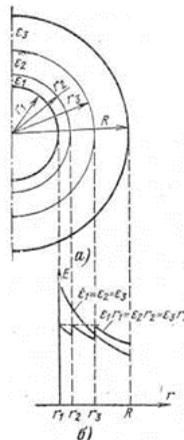


Рис. 2.5 Регулирование электрического поля путем градирования изоляции

а – схема градированной изоляции; б – изменение напряженности в изоляции без градирования и при градировании

2.3 Основные характеристики трансформаторного масла

Минеральное масло обладает *рядом особенностей*.

Электрическая прочность изоляционных масел, подвергнутых особо тщательной очистке, приближается к 10^6 В/см. Прочность технического масла значительно ниже и зависит от концентрации и вида примесей, играющих важную роль в процессах пробоя. Частицы примесей вызывают местные искажения эл. поля, а при определённых условиях, перемещаясь, деформируясь, они образуют цепочки - "мостики", вдоль которых облегчается развитие разряда.

Движение примесных частиц наблюдается в неоднородных полях, если $\varepsilon_ч \neq \varepsilon_м$. Если $\varepsilon_ч > \varepsilon_м$, твёрдые частицы устремляются в области с повышенной напряжённостью поля.

Вблизи каждой частицы $\varepsilon_ч > \varepsilon_м$ существует местная неоднородности электрического поля, поэтому частицы стремятся объединиться в цепочки, вытянутые вдоль силовых линий поля. При определённых условиях цепочки образуют "мостики" и по ним происходит пробой. В больших промежутках образование "мостиков" затрудняется, т.к. под действием электрического поля масло также движется. Поэтому в больших промежутках прочность масла больше, чем в малых.

Важнейшей примесью в технических маслах является влага. В малых количествах она может растворяться в масле и практически на $E_{пр}$ не влияет. Повышенная концентрация влаги сверх растворяющей способности масла приводит к образованию эмульсии (капельки воды диаметром 0.01 – 0.1 мкм). $E_{пр}$ резко снижается. Это объясняется втягиванием капелек в область высокой напряженности поля. Они деформируются в тончайшие ниточки; эл. поле резко искажается ($\varepsilon_в = 80$) и электрическая прочность уменьшается.

Чем больше концентрация эмульгированной влаги, тем меньше средние расстояния между капельками воды, и, следовательно, они легче сливаются. Поэтому увеличение влажности масла сопровождается снижением его эл. прочности (рис. 2.6).

Особенно сильное снижение прочности наблюдается у увлажненного масла, загрязнённого волокнами. Волокна гигроскопичны и интенсивно адсорбируют влагу, что приводит к увеличению их диэлектрической проницаемости. Поэтому процессы образования "мостиков" идут активнее.

Масла способны растворять значительное количество газов (при 20°C и нормальном давлении - до 10% по объему). Растворенные газы, как и примеси, снижают $E_{пр}$, т.к. в микропузырьках условия для развития разряда (особенно его начальных стадий) более благоприятны, чем в самом масле. Поэтому $E_{пр}$ таких масел зависит от давления. Электрическая прочность дегазированного масла от давления не зависит.

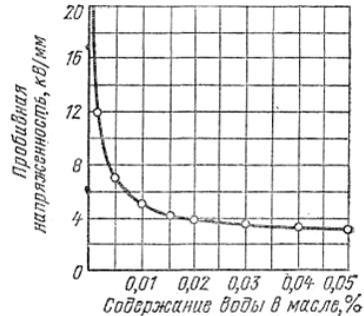


Рис. 2.6 Зависимость пробивной напряженности трансформаторного масла от концентрации влаги

В *слабонеоднородном* поле ($K_n < 3$) примеси существенно влияют на $U_{пр}$, а в *резконеоднородных* полях ($K_n \geq 3$) и при импульсах мостики не образуются, поэтому $U_{пр}$ не зависит от очистки масла.

Кратковременная электрическая прочность масляных промежутков сравнительно невелика особенно в случае неоднородных полей. Средние разрядные напряженности в масле при частоте 50 Гц для промежутков с резконеоднородным полем составляют всего 5,0-7,5 кВ/см. Поэтому чисто масляная изоляция в высоковольтных конструкциях оказывается экономически невыгодной.

2.4 Повышение электрической прочности масляной изоляции

Для повышения эл. прочности масляных промежутков используют *покрытие и изолирование* электродов твердой изоляцией, чаще всего слоями кабельной бумаги, а также барьеры из картона.

Покрывтие имеет малую толщину (1-2 мм), поэтому поле в масле практически не изменяется, а собственная эл. прочность покрытия не имеет значения. Эффект от покрытия состоит в том, что снижается вероятность образования устойчивых "мостиков" в масле.

Наибольший эффект дает покрытие при частоте 50 Гц в промежутках со слабонеоднородным полем и с маслом, загрязненным волокнами и влагой. Покрытие в этом случае повышает $U_{пр}$ на 70-100 %.

В резконеоднородном поле, как указывалось выше, образование "мостиков" затрудняется и поэтому эффект от покрытия составляет всего 10 - 15% и менее.

На импульсную прочность они не влияют, т.к. "мостики" при импульсах не успевают образоваться.

При постоянном напряжении покрытия также не оказывают влияния на $U_{пр}$.

При *изолировании* толщина твердого диэлектрика может достигать нескольких десятков миллиметров. Поскольку $\epsilon_d > \epsilon_m$, то существенно уменьшается напряженность поля вблизи электрода с изолированием. Поэтому изолирование наиболее эффективно в резконеоднородном поле, когда оно способствует выравниванию эл. поля.

При изолированных электродах разряд вначале возникает в масле. После пробоя масла практически все напряжение приложено к твердому диэлектрику, причем эл. поле в нем искажается,

становясь резконеоднородным вблизи канала разряда. Если толщина диэлектрика невелика - возникает пробой, если велика, то после нескольких воздействий разрядов на поверхности твердого диэлектрика возникают разрушения, приводящие к выходу всей конструкции из строя.

Поэтому для конструкций с изолированием в качестве $U_{пр}$ принимают напряжение, при котором происходит пробой масляного промежутка, даже если слой твердого диэлектрика не пробился.

Барьеры значительно повышают $U_{пр}$ и применяются при всех формах поля, однако их действие в различных полях различно.

В резконеоднородных полях на барьер, расположенный вблизи электрода с малым радиусом кривизны, оседают заряды (заряженные частицы) движущиеся от этого электрода. Поле между барьером и вторым электродом выравнивается, поэтому прочность промежутка возрастает.

При импульсах или очень кратковременных приложениях напряжения 50 Гц наилучший эффект будет при расположении барьера вплотную к электроду с малым радиусом кривизны. При более длительном воздействии напряжения 50 Гц барьер выгоднее располагать от этого электрода на расстоянии 15 ÷ 25% межэлектродного. При оптимальном расположении барьера напряжение сквозного пробоя повышается в 2-2,5 раза (рис. 2.7).

В слабонеоднородном поле барьер повышает $U_{пр}$ при 50 Гц благодаря тому, что препятствует образованию «мостиков». Наилучшее расположение барьера такое же, как и в резконеоднородном поле. Пробивное напряжение увеличивается при этом на 25 – 50 %. Импульсную прочность барьер не увеличивает. В установках ВН с масляным заполнением используется несколько барьеров. Барьер, ближайший к электроду с меньшим радиусом кривизны, выравнивает поле, а остальные действуют как в слабонеоднородном поле

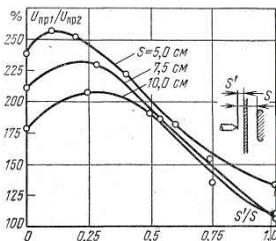


Рис. 2.7 Влияние плоского тонкого барьера на $U_{пр}$ масла

Собственная эл. прочность барьеров влияет на $U_{пр}$; оно растет приблизительно пропорционально суммарной толщине барьеров, если она не превышает 25 - 30% всего межэлектродного расстояния. При дальнейшем увеличении суммарной толщины барьеров увеличение $U_{пр}$ незначительно, т. к. разряды начинают разви-

Защита электрооборудования от перенапряжений

ваться по поверхности барьеров. $U_{пр}$ определяется и рассчитывается так же, как и в случае изолирования т.е. первого масляного канала.

2.5 Изоляция из сшитого полиэтилена

Сшитый полиэтилен (СПЭ) – это полимер углеводорода этилена, модифицированный на молекулярном уровне до выстраивания абсолютно новой структуры. Полученная в процессе «сшивки» система межмолекулярных связей СПЭ выглядит, как трехмерная ячеистая сетка, похожая на кристаллическую решетку твердых веществ (рис. 2.8)

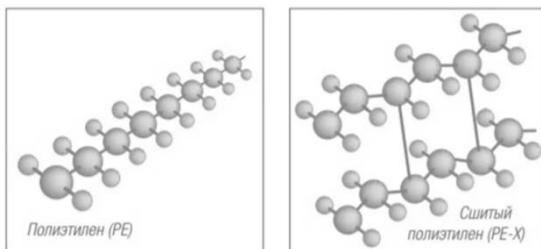


Рис. 2.8 Система межмолекулярных связей полиэтилена и СПЭ

Такое изменение дает особую прочность на разрыв и повышение всех остальных характеристик полиэтилена.

Массовое производство высоковольтных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на номинальное напряжение 110 кВ и выше началось еще в 70-х годах прошлого столетия. Современные СПЭ-кабели благодаря своей конструкции, технологии изготовления и совершенным изоляционным материалам технически более совершенны и более экономичны по сравнению с масляно-полненными кабелями и в последние годы быстро вытесняют в новых проектах кабели с бумажной изоляцией.

Основным преимуществом использования кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена является более высокая надежность кабельных линий (КЛ), что связано как с улучшенным качеством кабеля, так и с технологией монтажа концевых и соединительных муфт. Кроме того, СПЭ-кабели имеют меньший диаметр и легче, чем кабели с бумажно-масляной изоляцией, и поэтому они могут прокладываться большими длинами, что уменьшает число соединений и увеличивает надежность линий. Отсутствие жидких компонентов в изоляции позволяет использовать СПЭ-кабели в широком диапазоне окружающих температур и без ограничений по разности высот прокладки. По этой же причине КЛ, выполненные СПЭ-кабелями, экологически более безопасны и не требуют постоянного контроля и обслуживания в процессе эксплуатации.

Для надежной защиты изоляции кабелей от влаги используется оболочка из алюмополимерной ленты, сваренной с полиэтиленовой или ПВХ оболочкой, для радиальной герметизации.



Рис. 2.9 Элементы конструкции СПЭ-кабелей с пластмассовой оболочкой

Для обеспечения надежной работы кабеля периодически подвергаются испытаниям. Применительно к силовым кабелям с изоляцией из сшитого полиэтилена эффективным и экономичным считается метод испытаний напряжением сверхнизкой частоты 0,1 Гц, которое по величине не должно превышать номинальное напряжение КЛ более чем в 3 раза. Испытания при очень низких частотах со сменой полярности позволяют выявлять дефекты в изоляции без формирования объемных зарядов в структуре полиэтиленовой изоляции в отличие от того, как это происходит при приложении постоянного напряжения

2.6 Основные характеристики твердых диэлектриков

Электрическая прочность твердой изоляции выше, чем газообразной и жидкой $U_{пр\text{тв}} > U_{пр\text{ж}} > U_{пр\text{г}}$. Изоляционные конструкции, выполняемые из твердой изоляции, должны обеспечивать надежную работу и продолжительную эксплуатацию электротехнических устройств, подвергающихся длительно или кратковременно различным воздействиям. Поэтому важнейшими характеристиками твердых диэлектриков являются:

а) электрические: электропроводность, диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери, электрическая прочность;

б) механические: прочность на разрыв, сжатие, изгиб, расслоение, устойчивость при ударных и вибрационных нагрузках.

Удельное объемное сопротивление ρ_v сильно уменьшается с ростом температуры, увлажнением. Особенно резко уменьшается ρ_v при увлажнении диэлектриков, содержащих

примеси веществ, легко диссоциирующих и растворимых в воде. В анизотропных диэлектриках (слоистых, кристаллических) ρ_V зависит от направления поля.

Диэлектрическая проницаемость ε определяет ёмкость - важнейший параметр изоляции высоковольтных устройств. Она значительно изменяется с увеличением влажности и температуры, поэтому ёмкость изоляции может характеризовать степень её увлажнения.

Диэлектрические потери $\operatorname{tg} \delta$ вызывают нагрев диэлектриков; при недостаточном охлаждении диэлектрика они приводят к тепловому пробую.

Различают три вида пробоя твердого диэлектрика:

- 1) электрический — $E \sim 10^2 - 10^3$ кВ/мм;
- 2) тепловой — $E \sim 10 - 10^2$ кВ/мм;
- 3) старение — $E \sim 10$ кВ/мм и менее.

Нагревание изоляции до температуры сверх нормально допустимой ускоряет её износ. Опытным путём установлено *правило 10°* , гласящее, что *увеличение рабочей температуры на 10°C вызывает износ изоляции, вдвое сокращающий период её надёжней эксплуатации; наоборот, снижение рабочей температуры на 10°C увеличивает срок жизни изоляции вдвое.*

2.7 Частичные разряды в газовых включениях при переменном и постоянном напряжениях

Частичные разряды возникают в изоляции, имеющей газовые включения. Газовые включения могут появиться в изоляции в процессе изготовления вследствие усадки заливочных масс, компаундов, при несовершенной пропитке изоляции. В эксплуатации они могут возникнуть вследствие растрескивания или расслоения изоляции от механических нагрузок или при разложении диэлектриков с выделением газов, например, при сильном нагреве или под действием ЧР, развивающихся первоначально в жидком диэлектрике.

Обычно размеры газовых включений не превышают долей миллиметра и составляют весьма малую часть от полной толщины диэлектрика. Но они - слабые места в изоляции, т.к. Газы имеют меньшую электрическую прочность, чем твердые и жидкие диэлектрики. Из-за различия ε_r и ε_d в газовом включении напряжённость электрического поля E выше, чем в диэлектрике. Поэтому при приложении напряжения к изоляции ЧР возникают прежде всего в газовых включениях.

На рис. 2.10,б представлена схема замещения диэлектрика с газовыми включениями. На этой схеме C_B - ёмкость газового включения; $C_б$ - ёмкость участка изоляции, расположенного последовательно со включением; C_a - ёмкость всей остальной изоляции. Срабатывание разрядника (P) имитирует пробой газового включения, поэтому $U_{пр.р.} = U_{пр.г.вкл.}$. R - условно отражает сопротивление канала разряда во включении.

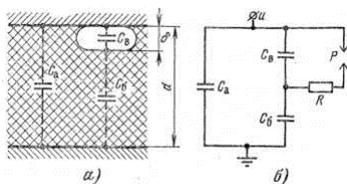


Рис.2.10 Схема изоляции с газовыми включениями (а) и её схема замещения при ЧР

Разряды могут следовать через равные ΔU_B . Напряжение появления ЧР $U_{чр}$ (действующее значение) будет

$$U_{чр} = \frac{U_{пр}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{C_B + C_б}{C_б} . \quad (2.6)$$

В изоляционной конструкции может быть несколько расположенных в разных местах газовых включений, имеющих разные размеры и $U_{пр}$, каждому из которых соответствует своё $U_{чрi}$ - появления ЧР. Эти включения не все будут пробиваться в один и тот же момент.

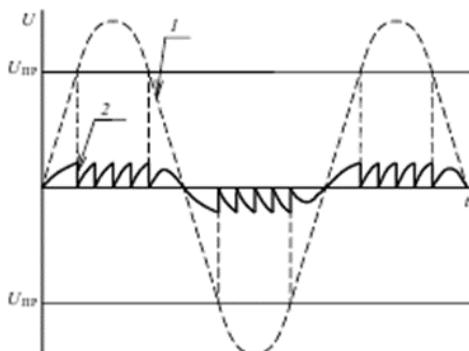


Рис. 2.11 Эпюры напряжения на воздушном включении в твердом диэлектрике: 1 – напряжение на образце; 2 – напряжение на включении; $U_{пр}$ – напряжение на образце, при котором происходит пробой воздушного включения

При *постоянном* напряжении определяющее влияние на распределение напряжения в изоляции оказывают сопротивления.

Поэтому в схеме замещения (рис. 2.12) R_B - сопротивление газового включения (по поверхности стенок его), а R_6 - сопротивление участка изоляции, расположенного последовательно со включением.

$$U_{\text{ЧР}} = U_{\text{ПР}} \cdot \frac{R_B + R_6}{R_B} \quad (2.7)$$

Для высоковольтной изоляции нормального качества периодичность ЧР составляет не менее нескольких десятков секунд, в то

время как в течение периода переменного напряжения их может быть десяток и более. Поэтому разрушающий эффект ЧР при постоянном напряжении незначителен. Допускаются более высокие напряжённости, а поэтому толщина изоляции уменьшается.

Следует иметь в виду, что увлажнение и нагрев изоляции могут уменьшить R_6 на несколько порядков, что приведет к резкому увеличению числа ЧР и темпов электрического старения. Поэтому изоляцию аппаратов постоянного тока надо защищать от перегрева и увлажнения.

2.8 Газовая изоляция, виды и особенности применения

Так как газовая изоляция имеет ряд преимуществ перед другими видами изоляции, ведутся поиски газов, обладающих повышенной электрической прочностью.

Очевидно, такие газы должны иметь достаточно большую энергию ионизации, малую длину свободного пробега, быть электроотрицательными.

Большой электрической прочностью обладают газы, получаемые из метана (CH_4) путем замещения водорода атомами хлора или фтора. Наилучшими характеристиками обладает *фреон* ($\text{C Cl}_2 \text{ F}_2$). Его прочность в 2,5 раза больше, чем у воздуха. Почти такую же прочность имеет SF_6 *элегаз*.

Газовая изоляция может конкурировать с жидкими или твердыми диэлектриками только тогда, когда её электрическая прочность будет такая же.

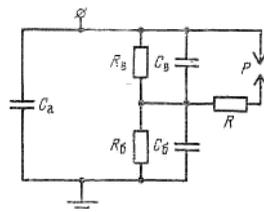


Рис. 2.12 Схема замещения изоляции с газовым включением для постоянного напряжения

Наиболее рациональным средством повышения электрической прочности газов является *повышение давления*. Из кривых рис. 2.13 видно, что при давлении выше 0,7 МПа (7атм) газовая изоляция вполне может конкурировать с другими видами изоляции.

В газе под давлением следует всячески избегать использования промежутков с резконеоднородным полем.

Газы под давлением используют в газонаполненных кабелях, конденсаторах, герметизированных РУ, электрофизических установках.

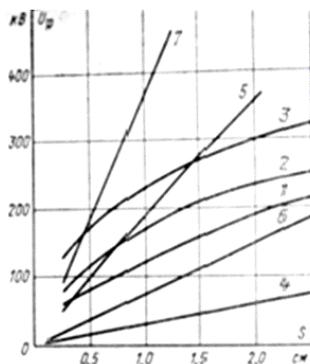


Рис. 2.13 Разрядные напряжения (амплитуда) в однородном поле

1- фарфор; 2- трансформаторное масло; 3- высокий вакуум; 4- воздух при 0,1 МПа; 5- воздух при 0,7 МПа; 6- элегаз при 0,1 МПа; 7- элегаз при 0,7 МПа.

2.9 Элегазовая изоляция

Для выполнения газовой изоляции в высоковольтных конструкциях используется элегаз, или шестифтористая сера. Элегаз – электроотрицательный газ, т.е. при взаимодействии его молекулы с электроном он способен образовать устойчивый отрицательный ион.

Чистый газообразный элегаз безвреден, химически неактивен, обладает повышенной теплоотводящей способностью и является очень хорошей дугогасящей средой; он не горит и не поддерживает горение, взрывобезопасен. Электрическая прочность элегаза в нормальных условиях примерно в 2,5 раза выше прочности воздуха.

Высокая электрическая прочность элегаза объясняется тем, что его молекулы легко присоединяют электроны, образуя устойчивые отрицательные ионы. Из-за этого затрудняется процесс размножения электронов в сильном электрическом поле, который составляет основу развития электрического разряда.

Повышение давления газа является одним из путей увеличения его электрической прочности. При увеличении давления электрическая прочность элегаза возрастает почти пропорционально

давлению и может быть выше прочности жидких и некоторых твердых диэлектриков. Наибольшее рабочее давление и, следовательно, наибольший уровень электрической прочности элегаза в изоляционной конструкции ограничивается возможностью сжижения элегаза при низких температурах, например, температура сжижения элегаза при давлении 0,3 МПа составляет $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при 0,5 МПа равна $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такие температуры у отключенного оборудования наружной установки вполне возможны зимой во многих районах страны.

Поведение элегаза отвечает в пределах широкого диапазона давлений закону Пашена.

Напряжение возникновения короны при использовании элегаза в неоднородных полях также значительно больше, чем при использовании воздуха.

Высокая электрическая прочность элегаза позволяет сократить изоляционные расстояния, уменьшить давления, что дает значительный выигрыш в габаритах, размерах и массе аппаратов и распределительных устройств.

Хотя удельная теплоемкость элегаза немного ниже, чем воздуха, удельная объемная теплоемкость (энергия, необходимая для подъема температуры 1 см^3 элегаза на 1°C) почти в 4 раза больше воздуха. Благодаря этому охлаждающая способность элегаза выше, чем воздуха. При естественной конвекции теплопередача в элегазе в 1,9 раза выше, чем в воздухе. Это позволяет повысить токовую нагрузку на 15-20% и при этом уменьшить сечение токоведущей цепи аппарата.

Благодаря химической инертности элегаза допустимая температура медных контактов может быть увеличена с $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для воздуха) до $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это позволяет дополнительно повысить токовую нагрузку аппарата. Положительные свойства позволили широко использовать элегаз в силовых трансформаторах, кабелях высокого напряжения и герметизированных комплектных распределительных устройствах (КРУЭ).

Элегаз не стареет, то есть не меняет своих свойств с течением времени, при электрическом разряде распадается, но быстро рекомбинирует, восстанавливая первоначальную электрическую прочность.

Дугогасительная способность элегаза в 4,5-5 раз больше, чем при воздушном дутье при одинаковых условиях. Скорость восстановления электрической прочности промежутка после угасания электрической дуги в элегазе примерно на порядок выше, чем в воздухе.

Для крепления токоведущих частей в комбинации с элегазом используются опорные изоляционные конструкции из литой эпоксидной изоляции. Основным материалом в ней является эпоксидная или эпоксидно-диановая смола.

В ряде случаев в качестве изоляции применяют не чистый элегаз, а его смесь с азотом или с фтористым углеродом.

Для элегазового оборудования просматривается тенденция выпуска коммутационной аппаратуры на параметры, соответствующие наиболее широким областям применения оборудования распределительных устройств для классов среднего напряжения.

Выпускаемая элегазовая коммутационная аппаратура (рис.2.14) характеризуется значительным разнообразием: контакторы, отдельные выключатели - внутренней и наружной установки. Комплектные распределительные устройства (КРУ) с элегазовыми коммутационными аппаратами, КРУ с элегазовой изоляцией (КРУЭ). Дополнительные преимущества КРУЭ по массо-габаритным характеристикам придали конструкции шкафного типа (в виде отдельных ячеек или группы ячеек, объединенных схемно в упрощенную подстанцию).

Элегазовым выключателям следует отдать предпочтение в области применения на напряжения 110-550 кВ, токи отключения до 50 кА, времена отключения 0,04-0,06 с, апериодическая составляющая менее 60 %, в климатических районах с минимальными минусовыми температурами выше минус 30 °С.

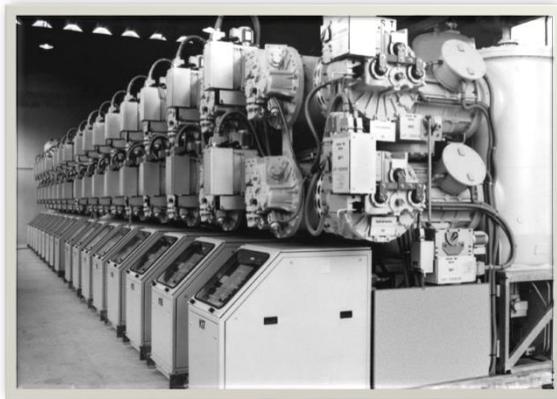


Рис. 2.14 Элегазовое изоляционное коммутационное оборудование КРУЭ

Кабели с элегазовой изоляцией под давлением (рис. 2.15) устроены следующим образом. В стальной трубе на распорках из

Защита электрооборудования от перенапряжений

твердого диэлектрика закреплена жила (или три жилы). Линия собирается из отрезков таких труб и заполняется высокопрочным газом - элегазом под давлением. Такие кабели имеют сравнительно простую конструкцию, малые диэлектрические потери, способность к восстановлению электрической прочности после случайного пробоя, малую емкость на единицу длины.



Рис. 2.15 Кабель с элегазовой изоляцией

3 МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ ИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

3.1 Система контрольных испытаний изоляционных конструкций и методы испытаний

Экономические показатели работы энергосистем во многом зависят от надёжности изоляции электрооборудования.

При серийном производстве и массовом применении оборудования ВН имеется некоторая вероятность появления в изоляции дефектов из-за разного рода ошибок в процессе изготовления, транспортировки, монтажа или во время эксплуатации. Чтобы существенно снизить вероятность аварийного повреждения изоляции, используется система контроля качества изоляционных конструкций путём различных испытаний.

Система контрольных испытаний следующая.

1. Государственные или ведомственные испытания, во время которых всесторонне проверяется пригодность изоляционной конструкции к работе в заданных условиях.

2. Приёмо-сдаточные испытания на заводе-изготовителе, а затем на месте эксплуатации после монтажа и других подготовительных работ.

3. Послеремонтные испытания.

4. Профилактические в эксплуатации.

С помощью последних выявляется не только изоляция со случайно возникшими дефектами, но также и естественно составившаяся. Объём, методы и нормы испытаний устанавливаются соответствующими ГОСТами, техническими условиями и ПТЭ.

Используемые при всех видах испытаний методы можно классифицировать следующим образом:

а) испытание повышенным напряжением с пробоем дефектной изоляции (разрушающие испытания);

б) испытания при рабочем или повышенном напряжении без пробоя (или с малой вероятностью пробоя) - измерения $tg\delta$ и характеристик ЧР;

в) неразрушающие методы - измерения $tg\delta$, сопротивления изоляции и ёмкостных характеристик при низких напряжениях, измерение распределения напряжения.

г) неэлектрические методы контроля – рентгеноскопия, ультразвук, наружный визуальный осмотр и др.

3.2 Схема замещения изоляции и её параметры

На рисунке 3.1 показана упрощённая схема замещения изоляции. В этой схеме C_{∞} - ёмкость изоляции, обусловленная ее геометрическими размерами и всеми видами быстрой поляризации (электронной, ионной). Величина C_{∞} не зависит от частоты.

Дополнительная ёмкость C_d обуславливается процессами накопления (абсорбции), зарядов при неоднородностях структуры диэлектрика (структурная поляризация) и дипольной поляризацией. Сопротивление r , включённое последовательно с C_d , означает, что процесс заряда и разряда ёмкости C_d протекает сравнительно медленно и связан с потерями энергии.

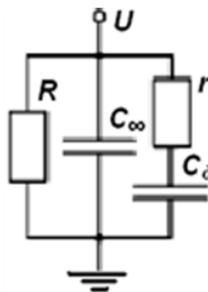


Рис. 3.1 Схема замещения изоляции

Сопротивление R определяется сквозной проводимостью изоляции.

3.3 Методы профилактических испытаний изоляции

Профилактика – система мероприятий, с помощью которых обеспечивается надежная работа изоляции в процессе эксплуатации. Профилактика проводится с целью выявления дефектов, возникающих в изоляции при эксплуатации.

Местные дефекты появляются в виде сосредоточенных трещин, воздушных включений, частичных увлажнений. В большинстве случаев эти дефекты не могут быть обнаружены в результате простого осмотра изоляции, поэтому для их выявления необходима определенная система профилактических испытаний. Профилактические испытания изоляции резко снижают аварии в энергетических системах из-за своевременного выявления дефектной изоляции.

Таблица 3.1

Методы испытания изоляции

№	Метод испытания изоляции	Дефекты, выявляемые этим методом	Общая характеристика метода
1	Измерение сопротивления изоляции	Сквозные проводящие пути или пробы	Один из основных методов

2	Измерение $\text{tg}\delta$	Процессы ионизации и старения изоляции в целом	Один из основных методов
3	Измерение ёмкости	Общее увлажнение изоляции	В основном для контроля влажности трансформаторов и электрических машин
4	Определение наличия частичных разрядов	Процессы ионизации в воздушных полостях	Дополнительный метод (получает всё большее распространение)
5	Измерение распределения напряжения	Частичный пробой, несквозные пути утечки	Основной метод для гирлянд изоляторов
6	Приложение повышенного напряжения	Местные дефекты при снижении электрической прочности	Контроль минимального запаса электрической прочности

3.4 Измерение сопротивления изоляции

Измерение сопротивления изоляции производится мегомметром. Результаты измерений сравнивается с нормами или с результатами предыдущих испытаний. Поскольку сопротивление изоляции сильно зависит от температуры, сравнивать нужно только результаты, приведенные к нормальной температуре (обычно 20°C).

Сопротивление изоляции зависит от длительности приложения напряжения. Для исключения влияния токов абсорбции, связанных с зарядом емкости C_d через сопротивление r , отсчёт результатов производят через 1 мин. после приложения напряжения. При этом сопротивление изоляции приближается к своему установившемуся значению, равному сопротивлению сквозной проводимости R . Значительное снижение R указывает на сильное загрязнение толщи или поверхности изоляции, а также на наличие сквозного или почти сквозного сосредоточенного дефекта.

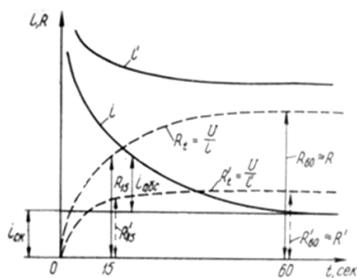


Рис. 3.2 Зависимость тока, протекающего через изоляцию (i , i') и сопротивления изоляции (R_t , R_t') от времени при включении на постоянное напряжение. Кривые i' , R_t' относятся к увлажненной изоляции; i и R_t – к сухой

Общий ток, который можно измерить после подачи постоянного напряжения на изоляцию, будет складываться из тока сквозной проводимости и абсорбционного тока (рис. 3.2):

$$i = i_{\text{ск}} + i_{\text{абс}} = \frac{U}{R} + \frac{U}{r} e^{-t/\tau},$$

где $\tau = rC_{\text{д}}$.

Если изоляция сильно увлажнена или загрязнена, то $i_{\text{ск}} = U/R$ увеличится, и разница между токами в начале и в конце процесса будет невелика.

Таким образом, по отношению токов (или сопротивлений), измеренных через 15 и 60 секунд после приложения напряжения к изоляции, можно судить о её качестве.

Критерий R_{60}/R_{15} является хорошим показателем степени увлажнения изоляции при температурах до 35-40°C. С ростом температуры ток $i_{\text{ск}}$ сильно возрастает и отношение R_{60}/R_{15} приближается к единице.

3.5 Диагностика состояния электрооборудования по характеристикам частичных разрядов

Частичными разрядами (ЧР) называют локальные множественные микропробои, возникающие в местах с пониженной электрической прочностью – порах, расслоениях изоляции, вблизи острых краев электрода и пр., размеры которых варьируются от долей до единиц миллиметров (см. п.2.7).

Основные количественные характеристики частичных разрядов:

- Частота повторения импульсов – число импульсов частичных разрядов за секунду;
- Фазный угол и время распространения импульса ЧР (t_i) $i=360$ (t_i/T), где t_i – время, измеряемое между предшествующим положительным переходом испытательного напряжения через ноль и импульсом ЧР. T – период испытательного напряжения.
- Средний ток частичных разрядов – это сумма абсолютных значений всех кажущихся зарядов за определенный промежуток времени, деленное на этот промежуток времени. Измеряется либо в кулонах за секунду, либо в амперах.
- Средняя мощность частичных разрядов – это производная величина, которая является средней мощностью импульса подводящая к выводам испытываемого объекта соответствующее

значение кажущегося заряда на протяжении выбранного контрольного интервала времени.

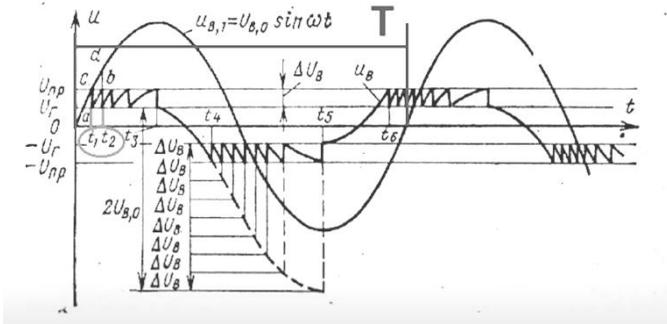


Рис. 3.3 Эпюры напряжения на воздушном включении в диэлектрике U_{B1} – напряжение, действующее на изоляционный промежуток; U_B – на включение при ЧР; U_{np} , U_t – напряжение возникновения и погасания разряда.

- Крутизна фронта. Излучение от этих импульсов происходит в очень широком спектральном диапазоне, что позволяет фиксировать их на различных частотах вплоть до ГГц.

Частичные разряды сопровождаются множеством различных эффектов как физических, электрических и даже химических. Химические эффекты — это то, что в итоге происходит в изоляции и ведет к ее разрушению. Кроме того, частичные разряды вызывают звуковые колебания.

Частичные разряды создают эффекты, которые можно наблюдать в рентгеновском, оптическом и ультрафиолетовых диапазонах, даже иногда в видимом спектре излучения, что позволяет использовать различные датчики, которые работают на этих принципах.

Химические реакции при ЧР. При возникновении частичных разрядов в маслонаполненной изоляции часть масла разлагается на углерод и водород. Углерод оседает на изоляции, а водород растворяется в масле и при их хроматографическом анализе его количество можно измерить. На этом и основана методика определения дефектов в масле. Известен факт, что элегаз при возникновении частичных разрядов разлагается и образуется SF_4 . SF_4 в свою очередь разлагается на следующие элементы (SO_2F_2 и SO_2F). Измерив их количество в объеме элегаза, можно судить о том, существуют ли в этом объеме разряды.

Разрушающее действие ЧР на диэлектрики обусловлено следующими явлениями, возникающими при пробое включения:

- 1 - воздействием ударных волн;
- 2 - тепловым воздействием;
- 3 - бомбардировкой заряженными частицами;
- 4 - воздействием химически активными продуктами разряда (озон, окислы азота);
- 5 - воздействием излучения;
- 6 - развитием древовидных побегов-дендритов.

Существуют следующие методы диагностики ЧР:

- электрический;
- электромагнитный, или дистанционный, СВЧ - метод;
- акустический;
- химический;
- оптический, или оптоэлектронный;
- термический.

Этими методами могут диагностироваться кабельные линии, генераторы, электродвигатели и трансформаторы, то есть практически все элементы электрической системы.

3.5.1 Электрические методы обнаружения частичных разрядов

Метод измерения электромагнитных волн, излучаемых частичными разрядами (индикаторы радиоизлучений - ИРИ). ИРИ называют дефектоскопами.

Этот метод основан на радиоприеме электромагнитных излучений при ЧР в изоляции. Он чаще всего применяется для выявления дефектных изоляторов на линиях электропередачи.

Недостатками этого метода являются: плохая помехоустойчивость (помехи создаются короной проводов и др.), отсутствие количественной оценки.

Методы регистрации высокочастотных составляющих частичных разрядов (индикаторы частичных разрядов - ИЧР). Они позволяют регистрировать самые слабые частичные разряды и обеспечивают количественные измерения энергии, рассеиваемой одиночными разрядами. ИЧР непосредственно включаются в цепь разряда. Они состоят из приемного контура, усилителя и измерительного прибора. В основу положено измерение кажущегося заряда:

$$\Delta Q_0 = \Delta U \cdot C_0,$$

где C_0 - емкость изоляции.

При возникновении ЧР появляются высокочастотные колебания с амплитудой ΔU . Индикатор частичных разрядов (ИЧР) подключен к объекту через разделительную ёмкость $C_{\text{разд}}$, которая служит заграждающим фильтром для токов рабочей частоты. При возникновении ЧР в объекте (C_x) хаотические колебания напряжения на объекте возбуждают в ИЧР незатухающие периодические колебания с частотой, соответствующей периоду колебаний контура:

$$T=2\pi\sqrt{LC}$$

Частота настройки ИЧР обычно принимается порядка нескольких десятков кГц. Амплитуда высокочастотных колебаний ΔU измеряется гальванометром Г. По значению ΔU может быть рассчитана кажущаяся интенсивность ионизации.

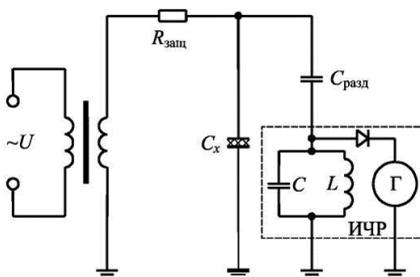


Рис. 3.4 Схема измерения частичных разрядов с применением колебательного контура и гальванометра: $R_{\text{защ}}$ - защитное сопротивление; C_x — испытуемый объект; $C_{\text{разд}}$ - разделительная емкость; $L-C$ — колебательный контур; Г - гальванометр

Электромагнитный или дистанционный, СВЧ-метод обнаружения ЧР позволяет обнаружить ЧР с помощью направленного приемного СВЧ антенного устройства. Этот метод не требует контакта с объектом измерения. Применение данного оборудования не зависит от класса напряжения, что является плюсом данного метода.

Для измерения используются специализированные антенны, которые работают в спектре частот от 200 МГц до 1,5 ГГц.



Рис. 3.5 Блок антенн

Недостатком метода является наличие большого количества помех, затрудняющих расшифровку полученных результатов (источник помех – корона на проводах, искрение коллекторов электрических машин и т. д.);

3.5.2 Акустические методы обнаружения ЧР

Часть энергии, выделившейся в канале разряда, преобразуется в механическую и создает короткий импульс давления (ударную волну) в окружающей среде. Распространяющийся со скоростью звука, определяемой этой средой, импульс давления может быть обнаружен соответствующим датчиком, расположенным вдали от места разрядов. На этом основаны методы контроля, называемые акустическими. Они применимы для решения значительного круга задач

Для регистрации ЧР применяются датчики преимущественно контактного типа. Датчики устанавливаются на поверхности бака испытываемого силового трансформатора в предполагаемой зоне возникновения ЧР. Участок поверхности бака испытываемого трансформатора перед установкой датчика должен быть тщательно очищен. Датчики должны иметь прижимные устройства, обеспечивающие постоянное усилие прижима контактной поверхности измерительного элемента датчика к поверхности бака испытываемого трансформатора. Измерительные элементы датчиков обладают пьезоэлектрическим или акустооптическим эффектом. Количество датчиков контактного типа, одновременно используемых при измерении, не менее трёх.

Акустические датчики, выполненные на направленных микрофонах, позволяют проверять установки и кабельные линии с безопасного расстояния. Эти датчики могут использоваться в системах постоянного мониторинга. Несмотря на недостатки в виде ограниченного радиуса действия и зависимости от уровня фонового шума данные устройства могут держать под наблюдением, например, высоковольтные ЛЭП в течении длительного времени.

4 ГРОЗОВЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И ЗАЩИТА ОТ НИХ

4.1 Защита ЛЭП от прямых ударов молнии грозозащитными тросами

Для защиты ЛЭП от прямых ударов молнии применяются грозозащитные тросы. Для характеристики надёжности защиты пользуются углами защиты α , т. е. углами между вертикальной линией, перпендикулярной тросу, и линией, соединяющей провод и трос (см. рис. 4.1).

Абсолютно надёжной тросовой защиты не существует; всегда остается некоторая вероятность поражения провода, однако при угле защиты, равном $20 - 22^\circ$ эта вероятность ничтожна и ЛЭП можно считать надёжно защищенной. Сопротивление заземления опор с глухозаземленной нейтралью должно быть менее 5 Ом, а с изолированной нейтралью – менее 10 Ом.

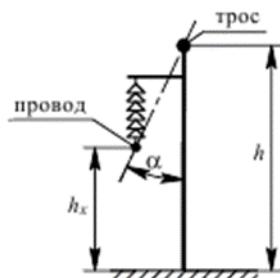


Рис. 4.1 Зона защиты тросового молниеотвода

4.2 Рекомендуемые способы грозозащиты линий

Линии 220 кВ и выше сооружаются на металлических (или железобетонных) опорах и должны защищаться тросами по всей длине. Подвеска тросов повышает стоимость таких линий всего на 5-7%, а число отключений при хорошем заземлении опор ($R_3=10$ Ом) очень невелико. То же относится и к линиям 110 кВ на металлических опорах.

Линии, пролегающие в районах со слабой грозовой деятельностью, например, в районах Крайнего Севера, где число грозовых дней в году меньше 10, защищать тросами не целесообразно.

Линии 110 кВ на деревянных опорах никакой дополнительной защиты не требуют, за исключением подвески тросов и установки РТ на подходах к подстанциям (но это делается для грозозащиты подстанций). ПУМ в провод этих линий в редких случаях вызывает междуфазное к.з., т.к. опора деревянная и однофазное к.з. не может возникнуть. Эти линии редко отключаются благодаря ис-

пользованию АПВ. Однако следует иметь в виду, что на таких линиях вследствие наличия добавочной изоляции дерева ($E_{\text{разр}} \approx 100$ кВ/м) при ПУМ в провод возникают весьма высокие перенапряжения, распространяющиеся в виде блуждающих волн по проводам. Поэтому если на линии есть опоры с пониженной изоляцией (например, металлические), то отключения такой линии будут очень частыми, так как волны, дойдя до металлической опоры, легко перекрывают гирлянду и вызывают однофазное к.з. Поэтому все такие опоры и другие места с ослабленной изоляцией, (например, переходы) должны быть защищены трубчатыми разрядниками.

Линии 35 кВ независимо от типа опор не защищаются тросами. Линии 35 кВ на деревянных опорах отключаются еще реже, чем 110 кВ. Благодаря малой рабочей напряженности поля по пути перекрытия (провод – гирлянда - деревянная траверса – гирлянда – провод) импульсные перекрытия редко переходят в к.з. Защита мест с ослабленной изоляцией желательна, но менее обязательна, чем для линий 110 кВ.

Линии 35 кВ на металлических опорах также не требуют тросовой защиты. Практически при ПУМ любой интенсивности гирлянда изоляторов перекрывается, но однофазное замыкание на землю (сеть 35 кВ работает с изолированной нейтралью) ликвидируется само или при помощи дугогасящей катушки. Только при очень мощных ПУМ в провод или опору может произойти междофазное к.з. Оно в большинстве случаев ликвидируется устройствами АПВ.

Линии 3 – 10 кВ не требуют особых мероприятий по грозозащите, за исключением установок трубчатых разрядников в местах с ослабленной изоляцией и на подходах к подстанциям. Эти линии выполняются на железобетонных и деревянных опорах. Последние обладают более высокой грозоупорностью за счет использования изоляции дерева. Импульсная прочность изоляции таких линий невелика, однако вероятность перехода импульсных перекрытий в силовую дугу не превышает 0,1. Для защиты деревянных опор линий 3 – 10 кВ от расщеплений при грозовых перекрытиях изоляции применяются защитные металлические спуски, бандажи и скобы.

4.3 Особенности грозозащиты подстанций

Подстанции, по сравнению с линиями, имеют небольшие размеры, но подстанция является весьма ответственным элементом электрической сети. От нее отходит ряд линий питающих потребителей целого района. Перекрытия изоляции электрооборудования подстанции связано с отключением части подстанции и возможным

прекращением электроснабжения целого района. Пробой внутренней изоляции трансформаторов и другого оборудования приводит к длительному простоя и дорогостоящему ремонту.

Поэтому грозозащита подстанций должна быть существенно более надежной, чем грозозащита линий. Она включает в себя следующие обязательные виды защиты:

1. От прямых ударов молний (ПУМ) в подстанцию;
2. От перекрытий при ударах молнии в заземленные конструкции подстанции;
3. От волн, приходящих с линии;
4. От ударов молнии в подходы к подстанциям.

Защита от прямых ударов молнии осуществляется с помощью стержневых молниеотводов, установленных на территории подстанции. Их число, расположение и высота выбираются так, чтобы все провода и оборудование подстанции находились в пределах зоны защиты молниеотводов.

Тросовые молниеотводы на основной территории подстанции применять не рекомендуется, т. к. в случае обрыва троса он может упасть на сборные шины и вывести из строя всю подстанцию.

Если защита подстанции от прямых ударов молнии выполнена с соблюдением зон защиты, то вероятность прорыва молнии на защищаемые объекты не превышает 0,001.

Каждый молниеотвод состоит из молниеприёмника, возвышающегося над защищаемым объектом, заземлителя и токоотвода, соединяющего молниеприемник с заземлителем. Необходимым условием надежной защиты является хорошее заземление молниеотвода, так как при ударе молнии в плохо заземленный молниеотвод на нем создается весьма высокое напряжение, способное вызвать пробой с молниеотвода на защищаемый объект.

Зона защита одиночного стержневого молниеотвода (рис. 4.2) представляет собой пространство вблизи молниеотвода, ограниченное поверхностью вращения в виде "шатра", образующая которой может быть найдена по эмпирической формуле:



Рис. 4.2 Зона защиты стержневого молниеотвода (1) и ее упрощенное построение (2).

$$r_x = \frac{1.6(h-h_x)}{1+h_x/h} p, \quad (4.1)$$

где $p = 1$ при $h \leq 30$ м; $p = \sqrt{30/h} = 5.5/\sqrt{h}$ при $h = 30 - 100$ м. Превышение высоты молниеотвода над защищаемым объектом называется активной высотой молниеотвода ($h - h_x = h_a$).

Зона защиты двух стержневых молниеотводов имеет значительно большие размер, чем сумма зон защиты двух одиночных молниеотводов. Внешняя часть зоны защиты строится так же, как и для одиночных стержневых молниеотводов. Построение сечений зоны защиты понятно из рисунка 4.3.

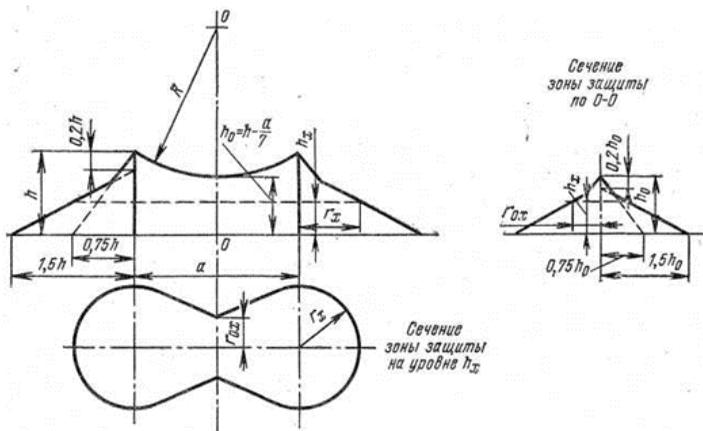


Рис. 4.3 Зона защиты двух стержневых молниеотводов

4.4 Разрядники и ограничители перенапряжения (ОПН) и их особенности

Для защиты оборудования от волн, набегающих с линии, служат искровые промежутки, вентильные и трубчатые разрядники, ОПН, включаемые параллельно защищаемому объекту. При воздействии перенапряжений факт пробоя защитного средства или защищаемой изоляции определяется видом их вольт-секундных характеристик (ВСХ) и их взаимным пересечением. Надежная защита будет обеспечиваться, если ВСХ средства защиты лежит ниже ВСХ защищаемого оборудования во всем диапазоне времени воздействующего напряжения (рис. 4.4). В этом случае при воздействии импульса перенапряжения в начале сработает защитное средство и ограничит амплитуду перенапряжения до величины безопасной для изоляции защищаемого объекта.

Средство защиты должно иметь пробивное и остающееся напряжение ниже допустимого на защищаемом объекте на некоторую величину, называемую интервалом координации, который должен составлять не менее 15% уровня допустимого напряжения.



Рис. 4.4 Вольт-секундные характеристики изоляции защищаемого оборудования и вентильного разрядника

Для уменьшения остающегося напряжения на рабочем сопротивлении разрядника все линии, подходящие и отходящие от подстанции, оборудуются тросовой защитой длиной 2–3 км – *защитные подходы*

В начале подхода устанавливают РТ1, способствующий ограничению амплитуды тока в разряднике подстанции. РТ2 предназначен для защиты выключателя (рис. 4.5).

Количество и места установки разрядников и ОПН выбирают так, чтобы расстояние между разрядниками и защищаемыми объектами не превышали безопасной величины (от 30 м до 150 м для разных случаев).

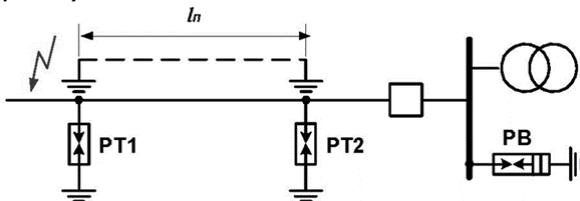


Рис. 4.5 Защита подхода к подстанции

Трубчатые разрядники (РТ) предназначены для защиты линейной изоляции от перенапряжений. Они широко распространены на напряжениях 6 –10 кВ. Их применяют также как вспомогательные средства для грозозащиты подстанций для предварительного ограничения амплитуд перенапряжений, приходящих с линий на подстанцию, с целью облегчения работы вентильных разрядников, установленных на подстанции. Трубчатый разрядник представляет собой трубку 2 (рис. 4.6) из изолирующего газогенерирующего материала, внутри которой, имеется дугогасящий нерегулируемый

промежуток S_1 , образованный стержневым электродом 3 и фланцем 4. Разрядник отделяется от рабочего напряжения внешним искровым промежутком S_2 . Фланец 1 заземляется.

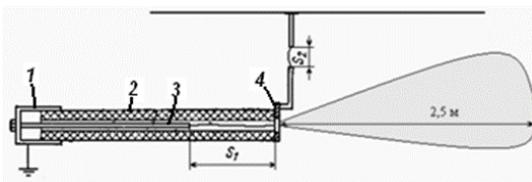


Рис. 4.6 Трубчатый разрядник

Недостатки: нестабильные характеристики, наличие зоны выхлопа и крутая вольт-секундная характеристика.

Срабатывание таких разрядников вызывает резкий спад напряжения, возникновение переходных процессов и опасных перенапряжений на продольной изоляции высоковольтных устройств (трансформаторы, генераторы, реакторы и т. д.).

Крутая вольт-секундная характеристика (ВСХ), т. к. форма электрического поля резконеоднородная, не позволяет осуществлять защиту объектов в области коротких времен воздействия напряжения (грозовые перенапряжения).

Вентильные разрядники (РВ). Уровень подстанционной изоляции ниже уровня изоляции линии. Поэтому набегающие волны представляют опасность для изоляции подстанционного оборудования и их амплитуда должна быть ограничена.

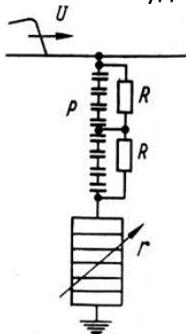


Рис.4.7 Устройство и схема включения вентильного разрядника

Основным аппаратом защиты от набегающих волн является РВ, который подключается между фазой установки и землей (рис. 4.7). Разрядник состоит из искрового промежутка и рабочего элемента, представляющего собой нелинейное сопротивление. Искровой промежуток выполняется многократным, что облегчает гашение дуги сопровождающего тока (тока промышленной частоты, протекающего через разрядник после пробоя волной искровых промежутков).

Вентильный разрядник работает следующим образом (рис.4.8,а). Когда мгновенное значение волны

перенапряжения на разряднике достигнет пробивного напряжения искровых промежутков, они пробиваются и срезают волну. Сопротивление разрядника при этом мало и через него протекает большой импульсный ток I_p , который и определяет напряжение на разряднике.

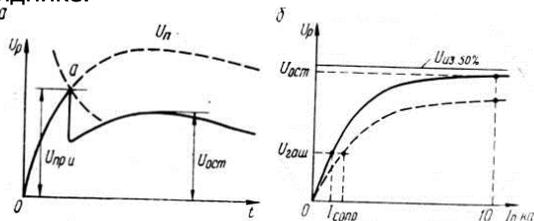


Рис.4.8 Срез волны разрядником (а) и вольт-амперная характеристика разрядника (б).

Наибольшее напряжение на разряднике при максимально допустимом импульсном токе через него I доп.и. называют *остающим напряжением* $U_{ост}$.

Это напряжение должно быть ниже импульсной прочности защищаемой изоляции (рис.4.8,б).

После прохождения импульсного тока через разрядник начинает протекать сопровождающий ток. Так как рабочее напряжение значительно ниже перенапряжения, то сопротивление нелинейного рабочего элемента резко возрастает и величина сопровождающего тока $I_{сопр}$ ограничивается до величины, при которой дуга, разбитая в многократном искровом промежутке на большое число коротких дуг, легко гасится. Как видно из рассмотренного, в основе работы вентильного разрядника лежит зависимость его сопротивления от величины приложенного напряжения, поэтому разрядники и названы *вентильными*.

В современных проектах ни трубчатые, ни вентильные разрядники не применяются. Вместо них устанавливаются ограничители перенапряжений.

Ограничители перенапряжения нелинейные (ОПН). Развитие технологии производства полупроводников обеспечило к началу 70-х годов создание материалов с резко - нелинейными резистивными характеристиками на основе оксида цинка ZnO. Выполненные на их базе ОПН позволяют ограничивать коммутационные перенапряжения на уровне $(1,65..1,8)U_{ф}$, а грозовых – на уровне $(2,2..2,4)U_{ф}$.

Резкая нелинейность вольтамперной характеристики варисторов на основе оксида цинка (рис.4.9,а) позволяет ставить колонку варисторов непосредственно под рабочее напряжение (рис.4.9,б), когда протекающий через колонку варисторов активный ток составляет доли миллиампера и необходимость в искровом промежутке отпадает.

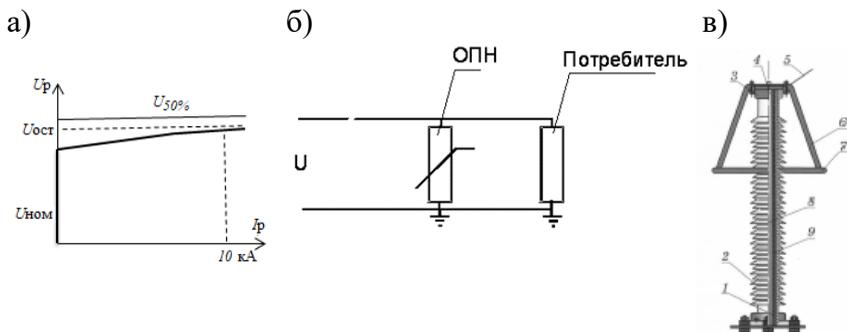


Рис. 4.9 Ограничитель перенапряжения

а) -вольт-амперная характеристика; б)- схема включения; в) – ОПН типа 220 УХЛ

- 1 - параллельно соединённые оксидно-цинковые варисторы;
- 2 – фарфоровый корпус; 3 – металлический фланец; 4 – клапан герметизации и взрывобезопасности; 5 - контактная пластина;
- 6 – экранодержатель; 7 – экран; 8 – демпфирующая полость;
- 9 – кварцевый песок

Высоконелинейные оксидно-цинковые резисторы выпускаются в виде дисков диаметром от 28 до 85 мм. ОПН выполняется путем последовательного и параллельного включения таких резисторов (рис. 4.9,в).

По сравнению с вентильными разрядниками ограничители перенапряжений обладают следующими преимуществами:

- глубоким уровнем ограничения всех видов перенапряжений;
- отсутствием сопровождающего тока после затухания волны перенапряжения;
- простотой конструкции и высокой надежностью в эксплуатации;
- стабильностью характеристик и устойчивостью к старению;
- способностью к рассеиванию больших энергий;
- стойкостью к атмосферным загрязнениям;
- малыми габаритами, весом и стоимостью.

5 ВНУТРЕННИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И ИХ ОГРАНИЧЕНИЕ

5.1 Общая характеристика внутренних перенапряжений

Электрические сети высокого напряжения обладают колебательными свойствами, так как содержат сосредоточенные и распределённые индуктивности и ёмкости. В нормальном режиме передачи мощности эти колебательные свойства не проявляются. Одной из причин возникновения колебаний электрической и магнитной энергий, запасённых в реактивных элементах сети, являются плановые и аварийные коммутации. Каждая коммутация вызывает переходный процесс, часто сопровождающийся перенапряжениями, которые могут привести к перекрытию изоляции. Среди таких коммутаций в первую очередь следует назвать отключение ненагруженных линий с повторными зажиганиями дуги в выключателе, отключение линий при асинхронном ходе генераторов, автоматическое повторное включение и ряд других.

На рис. 5.1 приведена классификация внутренних перенапряжений.

Внутренние перенапряжения по длительности и по причине возникновения делятся на квазистационарные и коммутационные.

Квазистационарные перенапряжения продолжаются от единиц секунд до десятков минут и возникают при несимметричных коротких замыканиях на землю, при разгоне генератора в случае резкого сброса нагрузки, при возникновении резонансных эффектов в линиях (при одностороннем питании линии), в электрических цепях при наличии реакторов, а также в цепях с катушками с насыщенным магнитопроводом, как на частоте 50 Гц, так и на высших гармониках.

Коммутационные перенапряжения возникают при переходных процессах и быстрых изменениях режима работы сети (при работе коммутационных аппаратов, при коротких замыканиях и при прочих резких изменениях режима) за счет энергии, запасённой в емкостных и индуктивных элементах. Наиболее часто такие перенапряжения имеют место при коммутациях линий, индуктивных элементов, конденсаторных батарей.

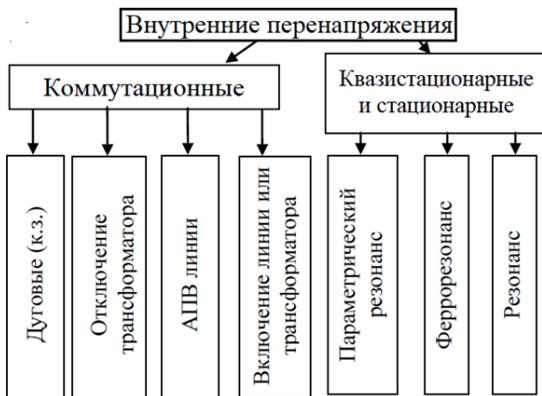


Рис. 5.1 Классификация внутренних перенапряжений

На рис. 5.2. приведена упрощённая однофазная схема электропередачи, дающая качественную иллюстрацию одного из случаев возникновения внутренних перенапряжений.

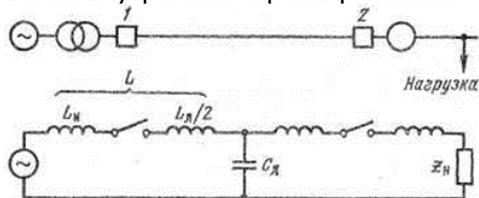


Рис. 5.2 Упрощенная схема замещения электропередачи

При замкнутом выключателе 2 ёмкостное сопротивление линии шунтировано сопротивлением нагрузки Z_n . При разомкнутом выключателе 2 (режим одностороннего питания) схема замещения превращается в LC колебательный контур. Такой режим осуществляется при включении ненагруженной линии выключателем 1 (пуск передачи) и может продолжаться длительно до тех пор, пока на разомкнутом конце не будет выполнена синхронизация. При аварийных и послеаварийных коммутациях режим одностороннего питания возможен вследствие неодновременного действия релейной защиты на обоих концах линии.

Процесс коммутации в системе, например, *включение разомкнутой линии толчком*, можно разбить на несколько этапов (рис. 5.3).

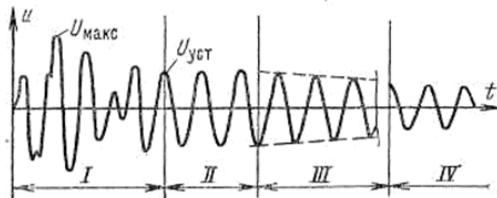


Рис. 5.3. Различные стадии переходного процесса после коммутации

В течение определённого времени, пока регуляторы возбуждения генераторов практически не успевают подействовать (области I и II), ЭДС источника может считаться неизменной. Первая стадия (область 1) характеризуется переходным процессом, который обычно продолжается несколько полупериодов. После затухания свободных колебаний наступает вторая стадия (область II), которая условно может быть названа "установившимся" (точнее квазиустановившимся) режимом; этот режим определяется параметрами схемы и неизменной ЭДС источника.

В дальнейшем благодаря действию регуляторов U_c постепенно уменьшается в соответствии с уменьшением ЭДС E (область III), пока не установится новый стационарный режим (область IV). Наибольший интерес представляют первые две стадии процесса, т.к. именно в это время возникают наибольшие перенапряжения.

При любой коммутации максимальное напряжение переходного процесса может быть представлено в следующем виде:

$$U_{\max} = K_{\text{уд}} U_{\text{уст}} = K_{\text{уд}} K_{\text{уст}} U_{\text{ф}} = K_{\text{п}} U_{\text{ф}}; \quad (5.1)$$

где $K_{\text{уд}}$ - отношение максимального напряжения переходного процесса к вынужденной составляющей (ударный коэффициент); $K_{\text{уст}}$ - отношение вынужденной составляющей (перенапряжения установившегося режима) к рабочему напряжению. Произведение $K_{\text{п}} = K_{\text{уд}} K_{\text{уст}}$ представляет собой *кратность внутренних перенапряжений*.

Повышения напряжения *установившегося режима* связаны с наличием следующих явлений.

Ёмкостный эффект в симметричных линейных схемах. Примером перенапряжений такого рода может служить повышение напряжения в схеме на рис. 5.1, где ёмкостный ток линии протекает через индуктивность линии и источника. Иначе говоря, собственная частота системы источник (индуктивность) - линия (индуктивность и ёмкость) может иметь тот же порядок, что и частота источника (рис. 5.1).

Перенапряжения, обусловленные ёмкостным эффектом, практически наблюдаются в электропередачах большой длины, характерных для номинальных напряжений 330 кВ и выше (электропередачи сверхвысокого напряжения - СВН). Для систем и сетей с номинальным напряжением до 220 кВ включительно обычно $\omega_1/\omega > 3$ и повышения напряжения из-за ёмкостного эффекта не значительны, достигая (1.1 – 1.15) U_{ϕ} что находится в пределах максимального рабочего напряжения.

Несимметрия системы, которая может возникать при несимметричных к.з. и неполнофазных режимах (обрыв провода, отказ фазы выключателя при отключении и включении). Особенно больших значений могут достигать перенапряжения этого вида в тех случаях, когда сопротивления в схемах прямой и нулевой последовательности имеют разные знаки, т.е. одно носит индуктивный, а другое ёмкостный характер.

Наличие в схеме нелинейных цепей со сталью (например, трансформаторов, иногда реакторов) приводит к возникновению *феррорезонансных перенапряжений* на рабочей частоте, которые чаще всего наблюдаются в неполнофазных режимах, а также к феррорезонансным перенапряжениям на высших и низших гармониках.

На величину ударного коэффициента оказывают влияние следующие факторы:

- частоты и декременты затухания свободных колебаний, которые определяются параметрами схемы;
- конечные и начальные условия (последние зависят от вида коммутации);
- характеристики выключателей, с помощью которых осуществляются коммутации.

При заданных условиях (схема и её параметры, вид коммутации, тип выключателя) $K_{уд}$ имеет статистический характер, т.е. при многократном повторении одной и той же коммутации можно получить различные значения ударного коэффициента. Например, при включении подобный статистический характер процесса определяется разбросом углов включения отдельных фаз.

Допустимые кратности внутренних перенапряжений по отношению к максимальному рабочему напряжению не должны превышать определённых величин, которые выбираются из технико - экономических соображений.

Кратности коммутационных перенапряжений в установках до 220 кВ, как правило, не превышают значений, приведенных в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Допустимые кратности коммутационных перенапряжений

Параметры	Режим нейтрали							
	изолированная			заземлённая				
$U_{ном}, \text{кВ}$	3-10	15; 20	35	110-220	330	500	750	1150
$U_{раб. макс}/U_{ном}$	1.2	1.2	1.15	1.15	1.1	1.05	1.05	1.05
$K_{доп}$	4.5	4.0	3.5	3.0	2.7	2.5	2.1	1.8

Напротив, в установках СВН, в особенности 500 кВ и выше, возможны коммутационные перенапряжения, превышающие $3U_{ф}$. Для их ограничения необходимо применение ОПН.

Ограничение длительных перенапряжений достигается главным образом с помощью схемных мероприятий.

Превентивные меры снижения перенапряжений – предотвращение возникновения перенапряжений или ограничение их величины в месте их возникновения:

- применение выключателей с шунтирующими резисторами;
- применение выключателей без повторных зажиганий дуги между контактами при их разведении;
- ёмкостная защита изоляции обмоток трансформаторов и реакторов;
- применение ёмкостных элементов для снижения перенапряжений;
- применение реакторов и др.

Коммутационные средства защиты от перенапряжений срабатывают и соединяют защищаемую цепь с заземлением в случае, когда перенапряжение в точке их установки превышает некоторую критическую величину.

К этим средствам относят разрядники и нелинейные ограничители перенапряжений.

5.2 Повышение напряжения, обусловленное ёмкостным эффектом

Рассмотрим схему, показанную на рис. 5.4, где длинная линия подключена через сопротивление X_H к источнику $E = U_{ф}$.

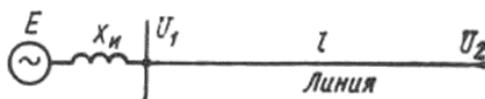


Рис. 5.4 Схема линии с односторонним питанием

В этой схеме при симметричном трехфазном режиме возможны значительные повышения напряжения промышленной частоты, особенно в конце линии, обусловленные прохождением емкостного тока через сосредоточенную индуктивность источника и распределенную индуктивность линии.

На рис. 5.5 показано относительное значение $U_2(l)$ при сопротивлении источника $X_{и} = 0$ и $X_{и} = 0,5Z_c$, где Z_c – волновое сопротивление линии. Эти зависимости имеют ярко выраженный резонансный характер. Для линии, присоединенной к источнику бесконечной мощности, резонанс наступает при $l = 1500$ км. Если рассматривается линия без потерь, то напряжение в конце линии такой длины равно бесконечности. В действительности, с учетом активного сопротивления напряжение определяется по формуле

$$U_{2.l=1500 \text{ км}} = 4/\pi QE \quad (5.2)$$

где Q – добротность, равная для воздушных линий 10-20, так что U_2 во много раз превосходит номинальное напряжение линии.

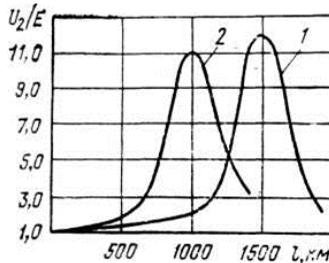


Рис. 5.5 Зависимость напряжений на конце разомкнутой линии от ее длины. 1- $X_{и}=0$; 2- $X_{и}=0,5Z_c$

При $X_{и} \neq 0$ точка резонанса сдвинута в сторону меньших длин, так как к индуктивности линии добавляется индуктивность источника.

Длины линий СВН могут достигать 1000 км и более, и U_2/E в соответствии с кривыми на рис. 5.5 могут возрасти весьма значительно. Рост U_2/E ограничивается активным сопротивлением проводов и действием короны на них.

Общая корона возникает на проводах линии СВН уже при напряжении $(1.15 - 1.2)U_{ном}$ и является основным фактором, ограничивающим резонансные повышения напряжения рабочей частоты. Корона эффективно ограничивает перенапряжения, превышающие $2.0 U_{ф}$. Резонансный пик ограничивается короной до $(2.5 - 3.0)U_{ф}$. Но из-за их длительности перенапряжения таких значений чрезмерны для передач СВН. Кроме того, интенсивная

корона создает помехи для линий связи. Поэтому резонансные перенапряжения требуют ограничения.

Ограничение осуществляется с помощью реакторов поперечной компенсации, компенсирующих емкостный ток линии, протекающий через индуктивное сопротивление источника. Это уменьшает эквивалентную входную емкость линии, что снижает напряжение U_1 . Снижается также перепад напряжений между началом и концом линии.

Рассмотрим зависимость эффективности реакторов от места их установки на примере односторонне включенной линии длиной 1000 км, подключенной к источнику с внутренним сопротивлением $jX_{и} = j0.5Z_c$. Пусть мощность реактора равна суммарной зарядной мощности линии.

Рассмотрим три случая установки реакторов.

а) Реактор включен в начале линии (рис. 5.6). Он частично компенсирует емкостный ток и уменьшает ток через сопротивление источника. Однако он не влияет на распределение напряжения вдоль линии и на коэффициент передачи. В результате $U_1 = 1.5E$, $U_2 = 3E$. Т.е. ограничение напряжения реактором недостаточно эффективно, хотя без реактора $U_1 = 7.25E$, т.е. условия, близкие к резонансным.

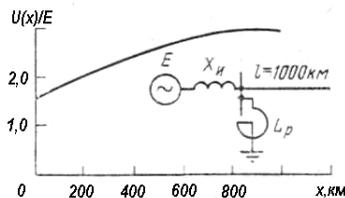


Рис. 5.6 Распределение напряжения вдоль линии при включении реактора в начале линии

б) Реактор в конце линии (рис. 5.7). $U_1 = 1.18E$, $U_2 = 0.8E$, т.е. напряжение в конце линии занижено.

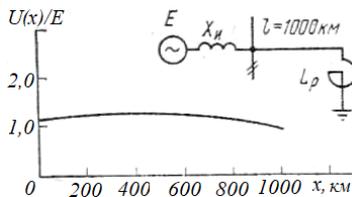


Рис. 5.7 Распределение напряжения вдоль линии при включении реактора в конце линии

в) Реактор включен в середине линии (рис.5.8).

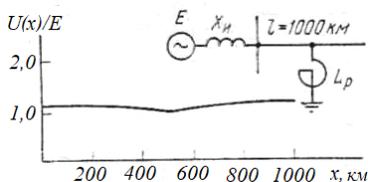


Рис. 5.8 Распределение напряжения вдоль линии при включении реактора в середине линии

Распределение напряжения получается более равномерным. $U_2 = 1.08E$. Это приемлемо по условиям синхронизации, однако концентрация столь большой мощности реакторов в одной точке линии недопустима с точки зрения условий нормального режима, например, баланса реактивной мощности и устойчивости.

Итак, наименьшее повышение напряжения происходит, если реактор включен в середине линии. Обычно в электропередачах СВН около $2/3$ мощности реакторов включается в середине линии, а $1/3$ - на генераторном конце линии. При вводе электропередачи в работу её включают сначала со стороны шин приемной системы, а синхронизацию производят на шинах станции.

Для компенсации индуктивного сопротивления линии с целью повышения статической устойчивости электропередачи применяется продольная емкостная компенсация. Поэтому компенсацию осуществляют как продольную, так и поперечную.

5.3 Феррорезонансные явления в электрических установках

Феррорезонансные явления возникают в схемах, содержащих наряду с линейной индуктивностью и емкостью элементы, обладающие нелинейной характеристикой намагничивания. К таким элементам относятся в первую очередь ветви намагничивания или магнитные шунты в схемах замещения трансформаторных обмоток (рис. 5.9).

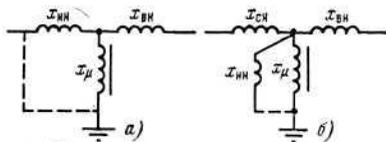


Рис. 5.9 Схема замещения двухобмоточных трансформаторов (а) или автотрансформаторов (б)

Если принять, что на магнитном шунте напряжение синусоидально, то кривая намагничивания может рассматриваться как зависимость амплитуды напряжения от амплитуды намагничивающего тока.

При $U_{\text{ном}}$ ток намагничивания составляет $(0.01 - 0.04)I_{\text{ном}}$ но при повышении напряжения резко возрастает, делаясь соизмеримым с $I_{\text{ном}}$. При этом сильно искажается форма кривой тока и возрастает удельный вес высших гармонических, так что амплитуда основной гармоники тока может составлять 50-70 % его максимального значения. Проходя через элементы схемы, включенные последовательно с нелинейной индуктивностью, несинусоидальный ток намагничивания создает несинусоидальное падение напряжения; следовательно, на магнитном шунте трансформатора и в других точках схемы появляются высшие гармонические напряжения.

В некоторых случаях насыщение трансформатора ограничивает напряжение промышленной частоты. Например, в схемах дальних передач магнитный шунт трансформатора может рассматриваться как нелинейный реактор, частично компенсирующий ёмкостный ток линии.

Однако, если сопротивление схемы относительно магнитного шунта ненагруженного или малонагруженного трансформатора носит емкостный характер, то при этом могут возникнуть значительные перенапряжения. Они являются типичным примером резонанса в нелинейных цепях (феррорезонанса) на промышленной частоте (гармонический резонанс) или на высших и низших частотах (негармонический резонанс).

Нелинейный гармонический резонанс чаще всего возникает при неполнофазных режимах в электроустановках. Неполнофазные режимы могут наблюдаться при обрыве провода линии, который иногда сопровождается заземлением одного из концов провода; при перегорании плавких вставок в одной или двух фазах; при отказе одной из фаз выключателя во время включения или отключения блока "линия - трансформатор" в схемах без выключателей на стороне высшего напряжения у шин приемной системы.

Таким образом, основной причиной появления феррорезонансных перенапряжений является нелинейный характер кривой намагничивания трансформатора. Нелинейная характеристика намагничивания трансформатора проявляется в основном на холостом ходу. Появление даже небольшой активной или реактивной нагрузки трансформатора исключает возможность его насыщения

магнитопровода. Появление активной составляющей нагрузки увеличивает потери в феррорезонансном контуре, оказывая демпфирующее влияние на феррорезонансные колебания.

5.4 Коммутационные перенапряжения при включениях

5.4.1 Перенапряжения при включении разомкнутой линии

Коммутационные перенапряжения (КПН) при включении линии вызваны колебательным процессом, возникающим при переходе от начального к установившемуся напряжению на линии. КПН возникают как при плановом включении линии, так и при АПВ.

Плановое включение холостой линии обычно производится с одного конца, а затем - с помощью устройств синхронизации - с другого. Наибольшая величина перенапряжений - при включении первого выключателя.

При плановом включении оперативный персонал стремится уменьшить ожидаемые КПН путем соответственной подготовки схемы, а именно: снижением возбуждения генераторов, уменьшением K_t трансформаторов, предварительным включением реакторов поперечной компенсации. При этом установившееся напряжение в конце разомкнутой линии стремятся иметь не более допустимого – $U_y \approx (1.1-1.2)U_{ном}$. В переходном процессе $U_{макс}$ может достигнуть $2U_{ном}$.

При АПВ U_y в конце разомкнутой линии может превышать указанные выше значения, т. к. АПВ предшествует нормальный режим передачи мощности, при котором возбуждение генераторов и K_t трансформаторов могут оказаться высокими.

5.4.2 Меры ограничения перенапряжений при включении линии и АПВ

а) *Применение вентильных разрядников или ОПН.* Если на конце линии установить специальный разрядник, выдерживающий длительные перенапряжения, типа РВМК или ОПН, то их срабатывание резко ограничивает перенапряжения.

б) *Применение реакторов с искровым присоединением.* Глухое присоединение реакторов приводит к дополнительным потерям реактивной мощности в нормальных режимах передачи больших мощностей. Поэтому может быть применено включение реакторов через искровой промежуток, шунтированный выключателем (рис. 5.10).

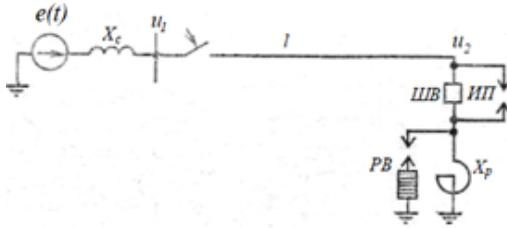


Рис. 5.10 Схема электропередачи с реактором, включенным через искровой промежуток

При возникновении перенапряжений, превышающих уставку искрового промежутка $U_{пр}$, последний пробивается и подключает к линии реактор, обеспечивая соответствующее снижение U . Для ограничения теплового воздействия дуги на электроды промежутков между ними шунтируют выключателем, включающимся от релейной защиты, которая срабатывает при появлении тока в реакторе. Если при качаниях возможны повышения напряжения ($1.1 - 1.2/U_{ф.макс.}$), то, учитывая разброс разрядных напряжений искрового промежутка $0.2 U_{пр}$, нижний предел пробивного напряжения $U_{пр} \approx (1.35-1.5) U_{ф.макс.}$

в) *Управление моментом включения выключателя.* Для каждой частоты свободных колебаний электропередачи можно указать такой угол включения, когда возникающее перенапряжение будет минимально. Исключение составит только случай резонанса ($\omega = \omega_1$), когда при любой фазе включения $K_{уд} = 1$.

Возможность управления моментом включения выключателей ВН в значительной мере определяется конструкцией выключателя и его системы управления. Разброс во времени при управляемом включении не должен превышать 1 мс. Такие требования могут быть выполнены, например, в воздушных выключателях со светооптической и механической системами управления.

г) *Применение шунтирующих сопротивлений в выключателях* (рис.5.11).

Выключатель имеет две системы контактов: ГК - главные контакты и ВК - вспомогательные.

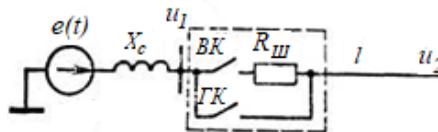


Рис. 5.11 Применение выключателей с шунтирующим резистором
ГК – главные контакты, ВК – вспомогательные контакты

При включении линии первыми замыкаются контакты ВК, тем самым вводя последовательно с линией сопротивление $R_{ш}$. Оно значительно демпфирует колебания напряжения в переходном процессе. Спустя 1,5 - 2,0 периода промышленной частоты замыкаются контакты ГК, заканчивая операцию включения линии.

5.5 Коммутационные перенапряжения при отключениях

5.5.1 Общие сведения

Значительные КПН могут возникнуть при отключениях ненагруженных линий, трансформаторов, обрыве токов к.з. или токов нагрузки, разрыве передачи при выпадении из синхронизма (отключение асинхронного хода).

После начала расхождения контактов выключателя при отключении между ними некоторое время продолжает гореть дуга. Момент обрыва тока зависит от скорости деионизации дуги, которая в свою очередь определяется характеристиками выключателя и обрываемым током. При больших токах сопротивление растягивающейся дуги невелико и не оказывает влияния на форму тока. Окончательный разрыв цепи происходит в момент прохождения тока через нулевое значение. При малых токах (например, при отключении токов ненагруженных трансформаторов) степень ионизации дуги незначительна, и под действием дутья в гасительной камере выключателя может произойти быстрый распад дугового канала еще до того, как ток достигнет нулевого значения - происходит "срез тока". При этом в индуктивности схемы выделяется большая энергия $L^2 I_{ср}^2 / 2$, которая может привести к значительным КПН.

После обрыва тока в выключателе электрическая прочность межконтактного промежутка постепенно возрастает в связи с расхождением контактов и деионизацией канала. На рис. 5.12 показаны зависимости $U_{проб}$ между контактами от времени, прошедшего после обрыва тока, для воздушных и масляных выключателей 110 кВ.

Воздушные выключатели имеют большую скорость расхождения контактов и дутье интенсивнее, чем масляные, поэтому рост электрической прочности вначале более быстрый, предельная же прочность у обоих типов выключателей практически одинакова.

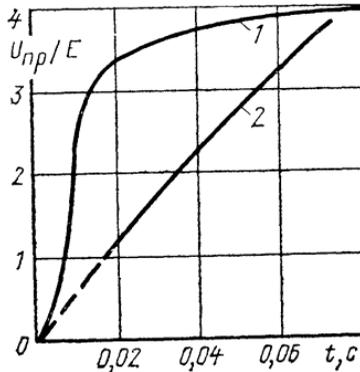


Рис. 5.12 Нарастание электрической прочности между контактами выключателей.

1 –воздушные выключатели. 2 – масляные выключатели

Если в процессе расхождения контактов окажется, что восстанавливающееся напряжение между контактами выше, чем прочность межконтактного промежутка, то возникает пробой промежутка, т.е. повторное включение цепи (повторное зажигание дуги). Следующий обрыв тока произойдет при переходе тока через нуль или при "срезе" тока в случае отключения, малых токов. Таким образом, отключение может представлять собой серию чередующихся отключений и включений, происходящих до тех пор, пока при полном расхождении контактов дуга окончательно не оборвется.

Следовательно, коммутации отключения можно разделить на коммутации двух видов:

- а) просто отключения, при которых КПН обусловлены только колебательными свойствами схемы;
- б) коммутации, осложненные неустойчивым горением дуги, т.е. чередующимися включениями и отключениями.

К коммутациям вида "а" относится отключение к.з. и асинхронного хода, вида "б" - отключение малых индуктивных токов (ненагруженных трансформаторов) и отключение ненагруженных линий.

Коммутации вида "б" представляют наибольший интерес, т.к. КПН получаются наибольшими.

5.5.2 Перенапряжения при отключении ненагруженных линий

Эти перенапряжения имеют много общего с перенапряжениями при АПВ, так как в обоих случаях они связаны с накоплением заряда на линии при ее отключении.

Предположим, что в схеме на рис. 5.13 выключатель отключает ненагруженную линию. В выключателе до отключения проходит синусоидальный ток, и при обрыве этого тока, происходящем в момент его перехода через нуль, напряжение на линии имеет амплитудное значение $U_0 = U_{\text{макс}}$.

После обрыва тока на линии сохраняется напряжение $U_0 = U_{\text{макс}}$, создаваемое зарядом на емкости линии. На контактах выключателя появляется напряжение $U_В(t)$, обусловленное разностью ЭДС источника $e = E_{\text{макс}} \cos \omega t$ и напряжения U_0 .

Через $T/2$ промышленной частоты напряжение на контактах выключателя достигнет значения $(-E_{\text{макс}} + U_0)$. Несмотря на то, что за прошедшие $T/2$ прочность промежутка между контактами значительно возросла, не исключена возможность пробоя и повторного зажигания дуги в выключателе.

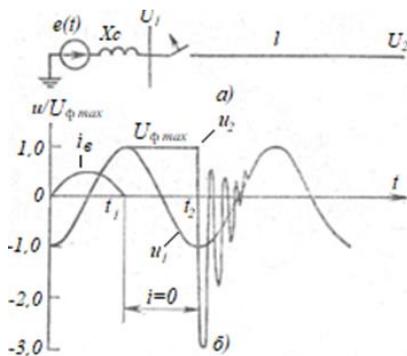


Рис. 5.13 Отключение ненагруженной линии

На рис. 5.13, б показан переходный процесс при отключении ненагруженной линии с повторным зажиганием через $T/2$. Максимальное напряжение в переходном процессе зависит от момента повторного пробоя. Возможность повторного пробоя определяется соотношением между кривыми возрастания электрической прочности промежутков выключателя и восстанавливающегося напряжения.

На рис. 5.14 показаны соответствующие кривые. Если кривая восстанавливающегося напряжения 1 пересечет кривую роста прочности промежутков выключателя $U_{\text{пр}}(t)$ в некоторый точке В, то

произойдет повторное зажигание дуги. Если же $U_b(t)$ - кривая 2 - растет медленно, то отключение линии произойдет без повторного пробоя.

Так как скорость роста восстанавливающегося напряжения может быть разной, то момент повторного зажигания дуги (точка B) случаен и КПН будут возникать с разными амплитудами. Путем обобщения многих экспериментальных данных было установлено, что следует ориентироваться на величину КПН порядка $3.0 U$.

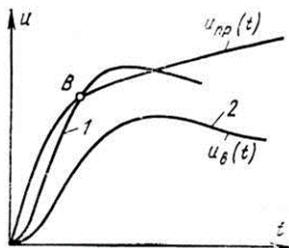


Рис. 5.14 Кривые восстанавливающейся прочности ($U_{пр}$) и напряжения на выключателе (U_b)

Для линий СВН с пониженным уровнем изоляции до $2.5 U_f$ и ниже КПН этого вида становятся наиболее важными. Поэтому обращается самое серьезное внимание на необходимость ограничения этих перенапряжений.

Для ограничения КПН используют:

1. магнитно-вентильные разрядники РВМК, подключаемые к концам линии и ОПН;
2. для снижения величины U_b - частичного снятия остаточного заряда с линии за $T/2$ и снижения $U_b(t)$ - для линий небольшой протяженности на концах линии подключают измерительные трансформаторы напряжения;
3. применяют быстродействующие воздушные выключатели, в которых возможны 1-2 повторных зажигания.

5.6 Перенапряжения при однофазных замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью

5.6.1 Общие сведения

Подавляющее большинство замыканий на землю сопровождается возникновением дуги. Заземляющие дуги могут быть разделены на два вида. Это, во-первых, длинные свободно горящие на открытом воздухе дуги, возникающие в результате перекрытия

внешней изоляции, например, вследствие грозových перенапряжений. Второй вид — короткие закрытые дуги внутри изолирующей среды, причиной возникновения которых являются пробои внутренней изоляции кабелей, машин, трансформаторов и т. д. Часто это могут быть начальные стадии повреждения, при которых изоляция может восстановить свою электрическую прочность, если обеспечено быстрое погасание дуги.

Металлическое замыкание в сети с изолированной нейтралью (рис. 5.15) приводит к повышению напряжения на неповрежденных фазах до $U_h = \sqrt{3}U_\phi$. Через место замыкания на землю проходит емкостной ток равный

$$I_3 = I_c = 3\omega C_0 l U_\phi, \quad (5.3)$$

где C_0 — емкость единицы длины линии, l — длина линии.

В небольших сетях 6—35 кВ ток однофазного замыкания на землю составляет всего несколько ампер, поэтому наличие замыкания на землю практически не сказывается на условиях передачи энергии потребителям. Треугольник линейных напряжений остается неискаженным, а повышение напряжения неповрежденных фаз относительно земли до линейного не представляет опасности для изоляции, так как ее уровень значительно выше.

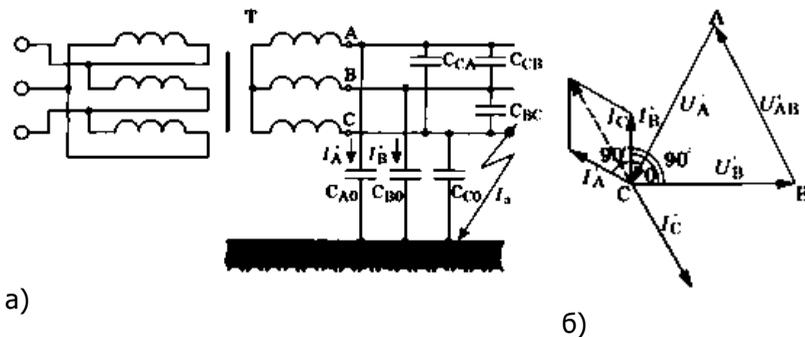


Рис.5.15 Однофазное замыкание на землю
а) схема замещения; б) векторная диаграмма режима

На основании многолетнего опыта эксплуатации допускается работа сетей с изолированной нейтралью 3—6 кВ при емкостных токах, не превышающих 30 А, 35 кВ — 10 А. Так как ёмкость на землю каждого провода $C_0 = 5000 — 6000$ пФ/км, то удельный ёмкостный ток замыкания на землю, т. е. ток на 1 км длины линии и 1 кВ номинального напряжения для воздушных линий, в среднем равен $I_{уд} = 3$ мА/км·кВ. Ёмкость на 1км кабельной линии зависит от

номинального напряжения, конструкции и сечения кабеля, но в среднем может быть оценена в 200 000 пФ/км, т.е. приблизительно $I_{уд} = 100 \text{ мА/км} \cdot \text{кВ}$.

Увеличение протяженности электрических систем приводит к увеличению ёмкостного тока до десятков и сотен ампер, что затрудняет условия деионизации дуги и увеличивает длительность ее горения. Этот процесс может быть неустойчивым, т. е. окончательному погасанию дуги предшествует несколько «попыток гашения» при переходе тока через нулевое значение с последующим повторным зажиганием дуги под влиянием восстанавливающегося напряжения на дуговом промежутке. Такая перемежающаяся, дуга приводит к развитию колебаний, возникающих при каждом обрыве и зажигании, т. е. к появлению перенапряжений, которые имеют много общего с перенапряжениями при отключении ненагруженных линий. Значения максимальных перенапряжений лежат в пределах $3 \div 3.4 U_{\phi}$.

Кратковременные перенапряжения порядка $3 U_{\phi}$ неопасны для нормальной изоляции при рабочих напряжениях до 35 кВ включительно. Однако длительные перенапряжения могут привести к тепловому пробою изоляции. Кроме того, на процесс развития перенапряжений в сетях часто действуют дополнительные факторы, повышающие их кратность. Замечено, в частности, что при неустойчивых дугах на неповрежденных фазах часто срабатывают трубчатые разрядники, имеющие пониженную кратность разрядного напряжения при рабочей частоте. Работа разрядников может привести к появлению перенапряжений, опасных для изоляции. Действительно, если происходит гашение дуги разрядником на неповрежденной фазе, а поврежденная фаза заземлена, то восстанавливающееся напряжение изменяется от нуля до $2 U_{\phi} = 3.46 U_{\phi}$. Поэтому каждый раз, когда происходит срабатывание РТ, на изоляцию здоровых фаз воздействует напряжение, равное $3.46 U_{\phi}$.

5.6.2 Заземление нейтрали через дугогасящий реактор

Одним из наиболее распространенных средств уменьшения (компенсации) тока замыкания на землю является включение в нейтраль регулируемого реактора (рис. 5.16), который называют также дугогасящей катушкой.

При включении в нейтраль трансформатора реактора через место замыкания вместе с ёмкостным током проходит индуктивный ток, обусловленный индуктивностью реактора L . Подбирая соответствующее значение индуктивности реактора, можно добиться равенства емкостной и индуктивной составляющих тока

замыкания. Компенсация емкостного тока наступит, если выполняется условие

$$\omega^2 = 1/L\kappa 3C_0, \quad (5.4)$$

где $\omega = 314$ 1/рад - промышленная частота.

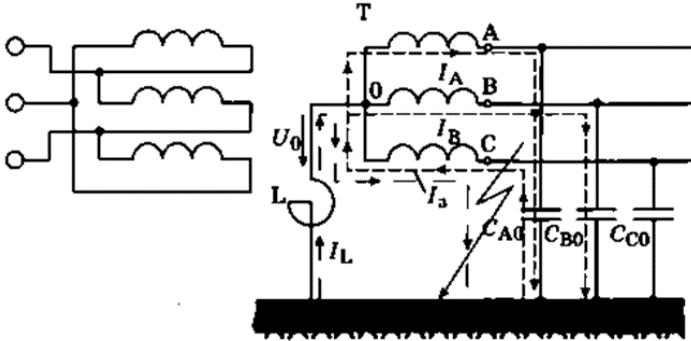


Рис. 5.16 Схема замещения сети с дугогасящей катушкой в нейтрали

Реактор играет двойную роль. При компенсации снижение тока до $I_{ост}$ обусловленного активными потерями в сети, способствует самопогасанию дуги в месте замыкания. Кроме того, реактор резко снижает скорость восстановления напряжения на дуге. Отношение токов в индуктивности L и емкости $3C_0$ носит название *настройки* заземляющего реактора (или иначе дугогасящей катушки)

$$K_H = I_K / I_C = \frac{U_\phi / j\omega L}{U_\phi / 1 / j\omega 3C_0} = \frac{1}{\omega^2 L 3C_0} = \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \quad (5.5)$$

где $\omega_0 = \sqrt{1/3LC_0}$

Остаточный ток в дуге

$$I_{ост} = \sqrt{I_A^2 + (I_C - I_K)^2} = \sqrt{I_A^2 + I_C(1 - K_H)^2}, \quad (5.6)$$

где $I_A = U_\phi g$ - активная составляющая тока в месте замыкания; $I_C = 3U_\phi \omega C_0$ - емкостная составляющая тока в месте замыкания, равная току замыкания в отсутствие заземляющего реактора.

Как видно из (5.6) остаточный ток тем меньше, чем ближе значение K_H к единице. При $K_H = 1$ (точная или резонансная настройка) через место замыкания протекает только малый активный ток. Погасание дуги происходит при прохождении тока $I_{ост}$ через нуть.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разевиг Д.В. Техника высоких напряжений. М.: Энергия, 1976. –488 с.
2. Важнов В.Ф. Высоковольтная техника в электроэнергетике: учебное пособие / В.Ф. Важнов, В.А. Лавринович; Томский политехнический университет.- Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011.- 176 с.
3. Закарюкин В.П. Техника высоких напряжений: Конспект лекций. – Иркутск: ИргУПС, 2005. – 137 с.
4. Горелов С.В. Изоляция и перенапряжения в системах электроснабжения. – М./ Берлин: Директ-Медиа, 2016. – 117 с.
5. Ройзен О.Г. Техника высоких напряжений: Учебное иллюстрированное пособие. – М.: Маршрут, 2005. – 39 с.