

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СЕТЯХ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Причинами перенапряжений в сетях среднего напряжения могут быть не только атмосферные разряды и коммутационные процессы, но и определенные эксплуатационные состояния.

Целью исследования является изучение перенапряжений в сетях среднего напряжения при атмосферных разрядах в электротехнические системы или рядом с ними, переключений в системе, нередко приводящих к коммутационным перенапряжениям.

Применение предлагаемых мероприятий позволит снизить кратность внутренних перенапряжений, снизить вероятность перекрытия изоляции и корректно подобрать ее защиту.

Ключевые слова: атмосферные перенапряжения, внутренние перенапряжения, срез тока, кратность перенапряжений.

Введение. Изоляцию электрооборудования необходимо проектировать так, чтобы она в течение длительного срока эксплуатации выдерживала не только номинальную величину напряжения электроустановки, но и кратковременное ее превышение. К таким кратковременным воздействиям относятся внутренние и атмосферные (грозовые) перенапряжения.

Причинами возникновения перенапряжений являются:

- воздействие прямого удара молнии (ПУМ);
- оперативные переключения (коммутация);
- сбой режима работы при коротких замыканиях на землю [1].

Атмосферные (грозовые) перенапряжения связаны с ударом молнии в электрооборудование, особенно в столь протяженный объект, каким являются воздушные линии электропередачи. Длительность единичных воздействий при грозовых перенапряжениях лежит в микросекундном диапазоне.

Повреждения и перекрытия изоляции при отсутствии защиты происходят из-за больших амплитуд атмосферного перенапряжения, величина которых может достигать нескольких миллионов вольт. Причиной частого возникновения индуктированных перенапряжений является то, что электроустановки имеют специальную защиту от ПУМ [2, 3].

Индуктированные перенапряжения возникают вследствие электростатической и электромагнитной индукции зарядов при разрядах молнии вблизи объекта в землю. астой причиной коммутационных перенапряжений является срабатывание устройств защиты.

Перенапряжения — одна из основных причин выхода из строя элементов электрических сетей напряжением до 35 кВ.

В сетях с воздушными линиями электропередач это в основном грозовые перенапряжения

(80 % случаев), перенапряжения от однофазных дуговых замыканий на землю — перемежающихся дуг — (около 10 % случаев) и перенапряжения от феррорезонансных явлений (около 5 % случаев) [2, 4].

В кабельных сетях на первом месте (80 % случаев) стоят перенапряжения от феррорезонансных явлений. Грозовые импульсы практически не проникают в кабельные сети.

Внутренние перенапряжения. Внутренние перенапряжения обусловлены кратковременным изменением режима или схемы электропередачи и связаны с перераспределением энергии, запасенной в электростатическом и электромагнитном полях элементов электрической сети. Длительность воздействия этих перенапряжений лежит в миллисекундном диапазоне [5].

Колебательные процессы или резонансные явления возникают в энергосистеме не только при аварийных, но и при нормальных режимах.

В любой энергосистеме (кроме нормального режима работы) могут возникнуть резонансные процессы. Резонансные явления, которые могут вызвать перенапряжения, возникают из-за нарушения баланса источника вырабатываемой энергии и потребителя.

Волновое сопротивление линии можно представить в виде бесконечного числа ячеек, но в данном случае следует выделить только элементы, которые накапливают энергию, — индуктивность и емкость линии, генераторы, трансформаторы и т. д. [6, 7].

Рассмотрим однофазную схему линии электропередачи, иллюстрирующую один из случаев возникновения перенапряжений (рис. 1а).

В данной схеме замещения введены следующие обозначения: L — индуктивность источника; L_A и C_A — индуктивность и емкость линии; L_c — индуктивность приемника; Z_n — сопротивление нагрузки (комплексное).

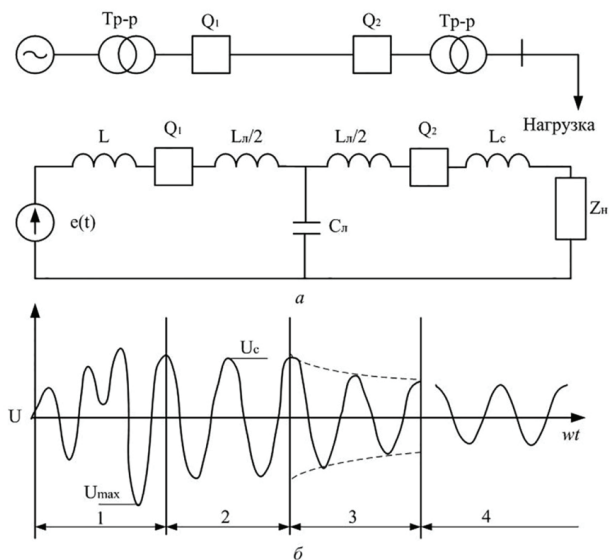


Рис. 1. Однофазная схема линии электропередачи:
 а — упрощенная схема замещения;
 б — стадии коммутационного процесса:
 1 — переходный процесс;
 2 — вынужденная составляющая переходного процесса;
 3 — работа регулировки возбуждения;
 4 — установившийся режим

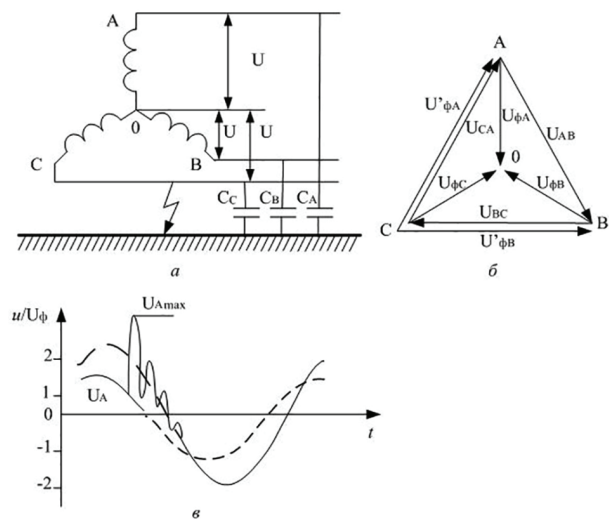


Рис. 2. Схема электроустановки:
 а — схема установки;
 б — диаграмма напряжений после замыкания фазы С на землю; в — изменение напряжений фаз от времени

Шунтирование емкости C_A сопротивлением нагрузки происходит при замкнутом выключателе Q_2 . При разомкнутом выключателе схема содержит в основном только реактивные элементы и превращается в колебательный контур $L_A - C_A$.

Любое внезапное возмущение в этой схеме (например, включение ненагруженной линии или повышение напряжения в схеме) приведет к возникновению колебаний напряжения на емкости C_A , т.е. к перенапряжениям. Эти перенапряжения будут обусловлены емкостным эффектом.

При отключении выключателя Q_1 (режим одностороннего питания), возможно включение ненагруженной линии выключателем Q_2 . Это может произойти за счет удвоения волны перенапряжения при отражении.

При несинхронной коммутации выключателей возможен режим одностороннего питания. Это возможно при разной марке выключателей (восстановление электрической прочности между контактами).

При мгновенном включении разомкнутой линии на напряжение процесс коммутации состоит из четырех этапов (рис. 1б).

До момента времени пока не изменится возбуждение генераторов, их э.д.с. можно считать неизменными (зона 1 и 2). Переходной процесс (зона 1) составляет несколько полупериодов.

По окончании переходного процесса и затухании свободных колебаний в системе наступает установившийся режим (зона 2). При величине установившегося напряжения больше допустимого напряжения в системе за счет регулировки напряжения медленно уменьшается (зона 3) и переходит в стационарный режим (зона 4). При коротком замыкании на землю при прохождении напряжения данной фазе через нуль на соседних фазах напряжение возрастает от $0,5 U_\phi$ до $1,5 U_\phi$ (рис. 2в).

Максимальное значение напряжения на неповрежденных фазах в переходном процессе, т.е. перенапряжение, может достигать значения $2,5 U_\phi$ [8].

Переходный процесс быстро затухает, его продолжительность составляет всего несколько периодов. После этого действует длительное повышение напряжения. На неповрежденных фазах устанавливается напряжение, равное междуфазному напряжению.

Величины и длительность таких перенапряжений зависят от номинального напряжения установки, фазы коммутации, параметров электрической цепи, характеристик и типов выключателей, наличия разрядников и поэтому носят статический характер.

Длинные ненагруженные линии для шин ТП являются емкостной нагрузкой. Отключение такой линии сопровождается удвоением амплитуды перенапряжения в конце линии.

Экспериментально установлено, что в сетях напряжением 110 кВ при отключении длинных ненагруженных линий масляными выключателями при недостаточно быстром отключении и малом нарастании электрической прочности между контактами могут возникать повторные многократные зажигания дуги в выключателе и перенапряжения могут достигать до $4 U_\phi$.

Для устранения этого явления необходимо применение таких дугогасительных устройств выключателя, которые обеспечивают нарастание восстанавливающейся электрической прочности между контактами, более быстро по сравнению с нарастанием напряжения источника питания.

При отключении ненагруженных трансформаторов возможны перенапряжения больше $3 U_\phi$. В линиях электропередач напряжением 500 кВ и выше необходимо учесть появление перенапряжений, которые связаны со спецификой передачи энергии по протяженным линиям.

Срез тока. Явление среза тока в вакуумных выключателях (ВВ) было обнаружено сразу после начала массового их использования. Перенапряжения среза тока послужили причиной повреждений печных трансформаторов, коммутировавшихся ВВ несколько десятков раз в сутки. Долгое время срез тока считался единственной причиной перенапряжений при коммутации ВВ индуктивных нагрузок. Механизм развития перенапряжений от среза тока не являются особенностью ВВ, они характерны для всех коммутационных аппаратов с высокой дугогасящей способностью, прерывающих малые токи, но природа среза в классических выключателях и в вакуумном выключателе различны [8, 9].

Явления среза тока для ВВ заключается в следующем:

— при отключении переменного тока, если момент начала разведения контактов не совпадает с нулем тока промышленной частоты, между контактами аппарата загорается дуга;

— дуга между контактами вакуумного выключателя горит в парах металла контактов, концентрация паров металла случайна и снижается при подходе тока к нулю.

Таким образом, срез тока в ВВ — практически мгновенный обрыв малого тока до перехода через ноль и нарушения условия горения вакуумной дуги.

При уменьшении напряжения от источника питания к дуге сработает выключатель при прохождении тока через нулевое значение.

Наличие среза тока характерно для всех высоковольтных выключателей. Наличие интенсивного дутья — одна из причин среза тока в выключателях. Охлаждение плазмы, уменьшение проводимости происходит из-за дутья.

Высокочастотные колебания развивающиеся в контуре приводят к тому, что суммарный ток в дуговом промежутке переходит через ноль и происходит гашение со срезом.

Неустойчивое горение дуги из-за небольших токов (горение в парах металла контактов) в вакуумных выключателях может служить причиной появления среза тока.

При срезе тока в индуктивной нагрузке накапливается энергия, которая при высвобождении на присоединенную емкость может вызывать перенапряжения.

Диаграмма среза тока представлена на рис. 3. Как видно из диаграммы, вакуумные выключатели с медно-хромовыми контактами имеют наименьший ток среза. Именно поэтому в большинстве случаев производители вакуумных выключателей используют медно-хромовые контакты (CuCr).

Смесь меди и хрома обладает следующими свойствами:

- механическая прочность;
- низкое содержание газа;
- отличная стойкость к дуговой эрозии;
- очень хорошее рассеивание токов короткого замыкания;
- низкая склонность к свариванию;
- экономичное производство с получением форм изделий, близких к заданным;
- отключающая способность до 63 кА;
- максимальный ток прерывания до 6 кА.

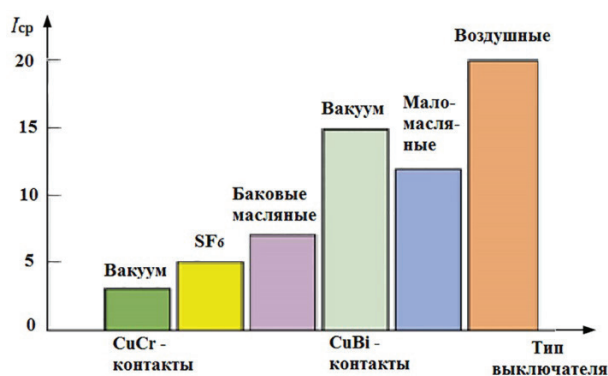


Рис. 3. Относительные токи среза выключателей с разными дугогасящими средами

Сравнение элегазовых выключателей и вакуумных показывает, что срез тока у них практически одинаков.

Это связано с тем, что интенсивность дугогашения у них зависит от величины протекающего тока. В принципе, ток среза элегазовых выключателей зависит от величины отключаемого тока, конструкции выключателя и емкости присоединения и может значительно превышать таковой для вакуумных. Таким образом, с точки зрения величины тока среза и создаваемых при этом перенапряжений, элегазовые выключатели не имеют никаких преимуществ перед вакуумными.

К существенному снижению уровней коммутационных перенапряжений при срезе тока могут привести множественные пробои межконтактного промежутка, в результате которых часть магнитной энергии, оставшейся в индуктивности нагрузки после среза, возвращается в источник.

На величину перенапряжения помимо тока среза оказывает влияние наличие мощности (индуктивная нагрузка), продолжительность емкостного присоединения (воздушные или кабельные линии).

При значительной длине емкостного присоединения возникновение среза тока в выключателе практически невозможно.

Причиной появления перенапряжений из-за среза тока может являться наличие нагрузки на вторичной стороне отключаемого трансформатора [1–3; 8–12].

Заключение. В ЛЭП напряжением 330 кВ и выше при ПУМ в провода (за счет наличия грозозащитных тросов и большой импульсной прочности) вероятность перекрытия изоляции гораздо ниже, чем у линий меньшего класса напряжения. Поэтому в установках напряжением более 330 кВ для защиты от внутренних перенапряжений основным методом является правильная координация изоляции и защитного аппарата.

Эффективное средство снижения перенапряжения из-за среза тока — подбор материала контактов с низким уровнем тока среза, однако чрезмерное уменьшение уровня тока среза значительно ухудшает отключающую способность вакуумного выключателя.

Кратность перенапряжений зависит от величины внутренних перенапряжений.

Отношение амплитуды перенапряжения к действующему значению наибольшего фазного напряжения определяется кратностью.

Мероприятия по применению ограничителей перенапряжения более новых конструкций с увеличением номинального напряжения электроустановок позволит снизить кратность внутренних перенапряжений.

Например, такие мероприятия позволили снизить кратность внутренних перенапряжений до $2,5 U_{\phi}$ в электроустановках напряжением более 500 кВ.

Библиографический список

1. Чайкина Л. П. Техника высоких напряжений. М.: Маршрут, 2005. 229 с.
2. Гиндулин Ф. А., Гольдштейн В. Г., Дульзон А. А. [и др.]. Перенапряжения в сетях 6–35 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1989. 192 с.
3. Бейер М. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения: пер. с нем. / ред. И. П. Кужекин, В. П. Ларионов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 555 с. ISBN 5-283-02460-1.
4. Шилов И. Г., Синюкова Т. В. Перенапряжения в распределительных электрических сетях // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2010. № 2 (20). С. 3–6.
5. Сибикин Ю. Д. Основы проектирования электропитания промышленных и гражданских зданий. 6-е изд., перераб. М.-Берлин: Директ-Медиа, 2016. 508 с. ISBN 978-5-4475-8608-9.
6. Базуткин В. В., Ларионов В. П., Пингаль Ю. С. Техника высоких напряжений. М.: Энергоатомиздат, 1986. 464 с.
7. Радченко В. Д. Техника высоких напряжений устройств электрической тяги. М.: Транспорт, 1975. 360 с.
8. Кадомская К. П., Лавров Ю. А., Рейхерд А. А. Перенапряжения в электрических сетях различного назначе-

ния и защита от них. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. 368 с.

9. Евдокунин Г., Дмитриев М., Гольдштейн С., Иваницкий Ю. Высоковольтные ВЛ. Коммутации и воздействия на выключатели // Новости электротехники. 2008. № 3 (51). С. 64–69.

10. Кадомская К. П., Лавров Ю. А., Лаптев О. И. Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Основные характеристики и электромагнитные процессы. Новосибирск: НГТУ. 2008. 345 с.

11. Сибикин М. Ю., Сибикин Ю. Д., Яшков В. А. Электропитание промышленных предприятий и установок. М.-Берлин: Директ-Медиа, 2014. 337 с. ISBN 978-5-4475-2582-8.

12. Левченко А. А. Подавление кондуктивных электромагнитных помех по импульсному напряжению в электрических сетях (6–10) кВ: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2009. 161 с.

КРОТЕНКО Евгений Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта».

SPIN-код: 9191-3348

AuthorID (РИНЦ): 357061

Адрес для переписки: k66.08@mail.ru

Для цитирования

Кротенко Е. А. Исследование перенапряжений в сетях среднего напряжения // Омский научный вестник. 2019. № 1 (163). С. 34–37. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-163-34-37.

Статья поступила в редакцию 24.12.2018 г.

© Е. А. Кротенко