

из равенства мощностей следует полная токовая симметрия в трехфазной сети.

Компьютерное моделирование показало достаточно хорошее совпадение теоретических оценок и протекающих процессов, а также принципиальную работоспособность устройства уравнивания мощности, поэтому в ближайшем будущем предполагается конструирование макета и физической модели устройства.

Выводы

Показано, что для обеспечения токовой симметрии трехфазной сети, питающей систему тягового

электропитания скоростной железной дороги переменного тока с количеством фаз, не кратным трем, параллельно вторичным обмоткам трансформаторного преобразователя Скотта из трех фаз в две, необходимо включить устройство уравнивания мощности с системой автоматического управления токами в зависимости от тяговых нагрузок. Отклонение напряжения на конденсаторной батарее от заданного не более чем на 10 % и плавное изменение токов в обмотках обеспечивается за счет одновременного медленного ПИ-регулирования напряжения на конденсаторе и многоуровневого ШИМ-регулирования токов через реакторы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая электроника: Справочное пособие: Пер. с нем. / под. ред. В.А. Лабунцова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 464 с.
2. Ворфоломеев Г.Н., Евдокимов С.А., Морозов П.В., Сопов В.И. Применение трансформаторов Скотта на тяговых подстан-

циях электрических железных дорог // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – № 6. – С. 273–276.

Поступила 14.12.2011 г.

УДК 621.316

АНАЛИЗ СПЕЦИФИКИ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА ДВУХЦЕПНЫХ ЛИНИЯХ 35–330 кВ

А.С. Ведерников

Самарский государственный технический университет
E-mail: es@samgtu.ru

Проанализирована специфика возникновения и протекания процессов коммутационных перенапряжений в двухцепных воздушных линиях электропередачи. Дана классификация внутренних перенапряжений по источникам из возникновения. Приведены выражения, позволяющие определять параметры волны перенапряжения. Даны рекомендации о необходимости учёта влияния соседней цепи двухцепной линии в расчётах величины коммутационных перенапряжений.

Ключевые слова:

Двухцепная линия электропередачи, коммутационное перенапряжение, автоматическое повторное включение.

Key words:

Double circuit transmission line, switching overvoltage, automatic reclosing

Повышение надежности таких специфических электроустановок, как двухцепные воздушные линии (ДВЛ) электропередачи, является важной научно-технической проблемой. Ее репрезентативные и адекватные решения требуются в разнообразных задачах проектирования, оперативного и диспетчерского управления режимами в электрических сетях различных классов напряжений.

Так как расстояния между всеми проводами обеих цепей ДВЛ определяются только длинами траверс опоры, взаимная электромагнитная и электростатическая связь между ними оказывает существенное влияние на параметры как установившихся, так и переходных режимов. Поскольку это влияние может изменять характеристики надёжности ДВЛ, а в отдельных случаях приводить к пере-

рывам в электропитании потребителей, актуальной является проблема математического описания ДВЛ в различных электрических режимах.

Общее о внутренних перенапряжениях на двухцепных линиях 35–330 кВ

На изоляцию двухцепных воздушных линий электропередачи, также как и на одноцепных, воздействуют стационарные, квазистационарные и коммутационные перенапряжения.

На величину кратности перенапряжений двухцепность оказывает влияние, главным образом, для перенапряжений, возникающих при коммутациях.

Стоит отметить, что любая линия при отключениях проходит два этапа: отключение тока нагруз-

ки (разрыв транзита) и отключение зарядного тока линии (отключение ненагруженной линии). И наоборот, при включениях вначале включается ненагруженная (холостая) линия, а далее – линия под нагрузку (замыкание транзита). Перенапряжения большей интенсивности возникают только при коммутациях линий в режиме холостого хода. Перенапряжения в режиме холостого хода возникают в различных точках линии. Однако, наибольшие по величине перенапряжения возникают на её удаленном (разомкнутом) конце [1].

Частота возникновения и кратность коммутационных перенапряжений также зависят от условий погоды и наличия на линии индуктивных элементов (электромагнитных трансформаторов, шунтирующих реакторов и силовых трансформаторов) [2].

Что касается условий погоды, здесь на максимальную величину коммутационных перенапряжений они сказываются в двух аспектах: при плохих погодных условиях и загрязнении изоляции, а следовательно демпфируются перенапряжения вследствие потерь. Кроме того, с ухудшением погоды снижается напряжение начала коронирования фазных проводов, а, следовательно, вследствие потерь на корону ограничиваются максимальные кратности перенапряжений.

Магнитная система электромагнитных трансформаторов напряжения при отключениях воздушных линий (ВЛ) в течение приблизительно четверти периода рабочей частоты $T=0,02$ с [3] насыщается и оказывает благоприятное влияние на уровень коммутационных перенапряжений в двух аспектах:

- а) снижает восстанавливающееся напряжение на контактах выключателя и снижает вероятность повторных зажиганий между ними;
- б) полностью отводит в землю остаточный заряд за время паузы автоматического повторного включения (АПВ) и обеспечивает нулевые начальные условия процесса повторного включения линии.

Такое же благоприятное влияние оказывают силовые трансформаторы, подключенные к ВЛ по блочной или полублочной схемам, или по схеме глухого присоединения их к ВЛ, а также шунтирующие реакторы. Однако, при наличии на ВЛ силовых трансформаторов время стекания остаточных зарядов составляет $\sim 0,5$ с, шунтирующих реакторов – порядка $\sim 3...5$ с [4].

Если время бестоковой паузы меньше, чем указанные значения, то не будут обеспечены нулевые начальные условия переходного процесса повторного включения, так как на ВЛ сохранится остаточное напряжение.

Перенапряжения при оперативных отключениях и отключениях коротких замыканий на двухцепных воздушных линиях

При отключениях (оперативных и аварийных) на межконтактный промежуток влияет разность

напряжения со стороны сборных шин питающей подстанции $U_{ш}$ и остающегося напряжения на ВЛ U_{01} .

Величина U_{01} , а также скорость изменения и форма остающегося напряжения на коммутируемой цепи U_0 определяются наличием или отсутствием на ВЛ индуктивных элементов между фазными проводами и землей. Это справедливо, если линия одноцепного исполнения и нет других влияющих на нее источников.

Если линия двухцепного исполнения – величина U_0 будет определяться, как сумма U_{01} и U_{02} , где U_{02} – дополнительно наведенное напряжение на проводах первой цепи от второй цепи. При этом максимальные перенапряжения при отключениях современными элегазовыми выключателями будут определены по формуле [5]:

$$U_{\max} = U_0 + (U_{ш} - U_0)P_y, \quad (1)$$

где P_y – ударный коэффициент, теоретически без учета потерь на линии $P_y=2$, а с учетом потерь $P_y \leq 1,8$.

При этом абсолютно максимальные перенапряжения будут иметь место, если полярность U_0 и $U_{ш}$ не совпадают.

Расчеты показали, что если не учитывать влияние второй цепи, U_{\max} для ВЛ 330 кВ длиной 250 км при величине предвключенного индуктивного сопротивления $X_{л1}=50$ Ом при отключениях равно $U_{\max}=1,8U_{\phi}$, где U_{ϕ} – фазное напряжение линии. При учете второй цепи – $U'_{\max}=1,2U_{\max}=2,16U_{\phi}$.

Значение U'_{\max} если на ВЛ установлены:

- трансформаторы напряжения $\approx 1,5U_{\phi}$;
- силовые трансформаторы или шунтирующие реакторы $\approx 1,6U_{\phi}$.

Перенапряжения при оперативных включениях

Оперативные включения ВЛ происходят не при металлических замыканиях подвижных и неподвижных контактов выключателей, а в момент пробоя промежутка между их сходящимися контактами в различных средах (вакуум, газ, элегаз, масло). Разумеется, что в худшем случае включение линии может произойти в максимуме напряжения на шинах питающей подстанции.

Кроме того, как известно, любой выключатель (кроме полупроводникового) имеет разброс (неоднородность) значений времени замыкания полюсов при включениях. Поэтому на первой включенной фазе линии трехфазного исполнения $U_{\max1}$ будет отличаться от перенапряжений $U_{\max2}$ (второй фазы) и $U_{\max3}$ (третьей фазы), определяемых по выражениям

$$\begin{aligned} U_{\max2} &= U_{нач2} + (U_{уст} - U_{нач2})P_y; \\ U_{\max3} &= U_{нач3} + (U_{уст} - U_{нач3})P_y. \end{aligned} \quad (2)$$

где $U_{\max2}=K_{1-2}U_{\max1}$; $U_{\max3}=K_{12-3}U_{\max2}$; K_{1-2} – коэффициент электромагнитной связи между первой включенной и второй фазой; K_{12-3} – то же между двумя включенными и третьей фазой.

Так, если $U_{\max 1} \approx 2$, то для одноцепных линий $U_{\max 2} \approx 2,2$; $U_{\max 3} \approx 2,4$.

Если же линия двухцепная, значения максимальных перенапряжений будут определяться выражениями

$$\begin{aligned} U'_{\max 2} &= U'_{\text{нач}2} + (U_{\text{уст}} - U'_{\text{нач}2})P_y; \\ U'_{\max 3} &= U'_{\text{нач}3} + (U_{\text{уст}} - U'_{\text{нач}3})P_y. \end{aligned} \quad (3)$$

где $U'_{\text{нач}2}$ и $U'_{\text{нач}3}$ – начальные напряжения на второй и третьей фазах с учётом влияния другой цепи.

Проведены расчёты для типовых опор ВЛ 35–330 кВ. В среднем с учётом коэффициентов связи, начальные напряжения всех трёх фаз определяются по выражению

$$\begin{aligned} U'_{\text{нач}1} &= K_{123-1} U_{\text{нач}1}; \\ U'_{\text{нач}2} &= K_{123-2} U_{\text{нач}2}; \\ U'_{\text{нач}3} &= K_{123-3} U_{\text{нач}3}, \end{aligned}$$

где K_{123-1} , K_{123-2} и K_{123-3} – коэффициенты связи между фазами первой второй и третьей фазы второй цепи и цепи, находящейся в работе; $U_{\text{нач}1}$, $U_{\text{нач}2}$ и $U_{\text{нач}3}$ – начальные напряжения на фазах без учёта влияния другой цепи.

С учётом второй цепи для типовых опор ВЛ 35–330 кВ получено (в среднем):

$$\begin{aligned} U'_{\max 1} &\approx 2,1U_\phi; \\ U'_{\max 2} &\approx 2,4U_\phi; \\ U'_{\max 3} &\approx 2,6U_\phi. \end{aligned}$$

То есть, наличие второй включенной цепи значительно отражается в величине перенапряжений при коммутациях первой цепи 110–330 кВ. Коммутационные перенапряжения для двухцепных линий 35 кВ не актуальны, поскольку конструкция изоляции таких линий подразумевает больший запас по электрической прочности [4].

Перенапряжения при АПВ

Перенапряжения на второй цепи в цикле АПВ при симметричных отключениях в первой цепи приблизительно такие же, что и при оперативных (плановых) отключениях.

Что же касается отключений при несимметричных (однофазных и двухфазных) коротких замыканиях, то перенапряжения в первом приближении будут в $K_{\text{кз}}$ раз больше, чем при отключениях в симметричном трёхфазном режиме. Коэффициент $K_{\text{кз}}$ называется коэффициентом однофазного заземления [4] и определяется по формуле

$$K_{\text{кз}} = \frac{\sqrt{3(a^2 + a + 1)}}{2 + a},$$

где $a = x_0/x_1$, x_0 , x_1 – индуктивные сопротивления по нулевой и прямой последовательностям соответственно.

Обычно значение величины a не превышает 3. Так, если $a=2$, то

$$K_{\text{кз}} = \frac{\sqrt{3(2^2 + 2 + 1)}}{2 + 2} = \frac{\sqrt{21}}{4} = \frac{4,58}{4} = 1,145.$$

Большую опасность представляют перенапряжения в цикле включения АПВ. Их величина, как отмечалось выше, зависит от величины остающегося напряжения $U'_0 = U_0 + \Delta U_0$ на коммутируемой цепи перед включением (после бестоковой паузы АПВ $t_{\text{АПВ}}$).

Здесь U_0 – остающееся напряжение на коммутируемой цепи без учёта влияния работающей цепи, ΔU_0 – дополнительное (наведенное) напряжение на коммутируемой цепи от цепи, находящейся в работе.

Как отмечалось, U_0 зависит от времени бестоковой паузы АПВ $t_{\text{АПВ}}$, погодных условий (при отсутствии индуктивных элементов между фазными проводами ВЛ и землёй), а также наличия на линии упомянутых индуктивных элементов.

По результатам проведённых расчётов статистических характеристик кратности перенапряжений для двухцепных линий 110–330 кВ построены зависимости, приведённые на рис. 1, 2.

Как видно из приведённых графиков, наибольшие напряжения могут иметь место при АПВ и при отсутствии на линиях индуктивных элементов, независимо от схем их подключения. Подключение к ДВЛ электромагнитных трансформаторов напряжения, шунтирующих реакторов и силовых трансформаторов снижает перенапряжения, т. к. снижается скорость восстанавливающегося напряжения на контактах выключателей и вероятность возникновения опасных повторных зажигания. Это приводит к тому, что статистические характеристики кратности перенапряжений при АПВ практически совпадают с таковыми при оперативных включениях.

Выводы

1. Проанализирована специфика возникновения и протекания процессов коммутационных перенапряжений в двухцепных воздушных линиях электропередачи. Дана классификация внутренних перенапряжений по источникам их возникновения.
2. Для двухцепных линий 35 кВ коммутационные перенапряжения не актуальны, поэтому влиянием одной цепи на другую можно пренебречь.
3. В сетях 110–330 кВ для расчёта коммутационных перенапряжений на одной из цепей двухцепной линии влиянием другой цепи пренебречь нельзя, поскольку оно может привести к значительным перенапряжениям.

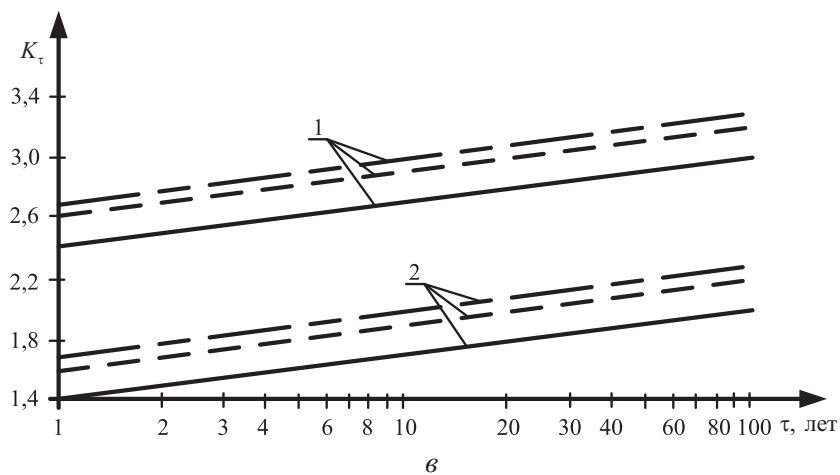
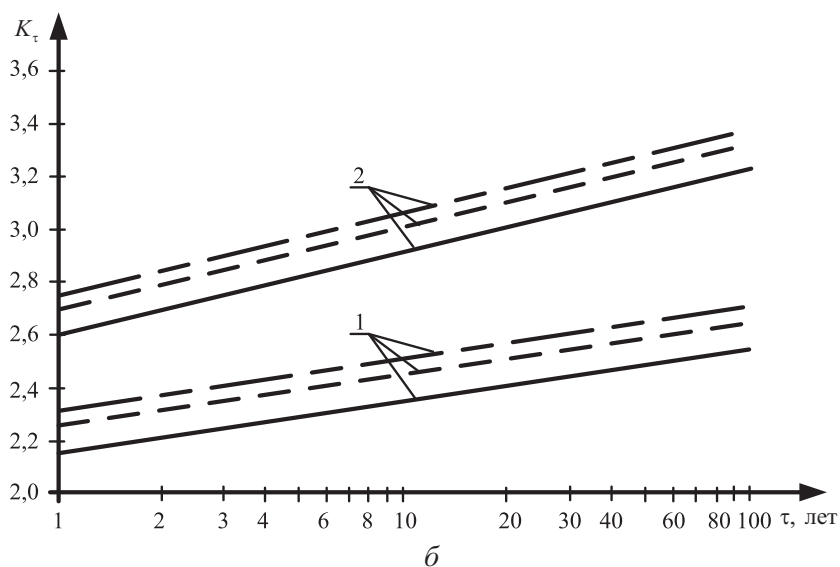
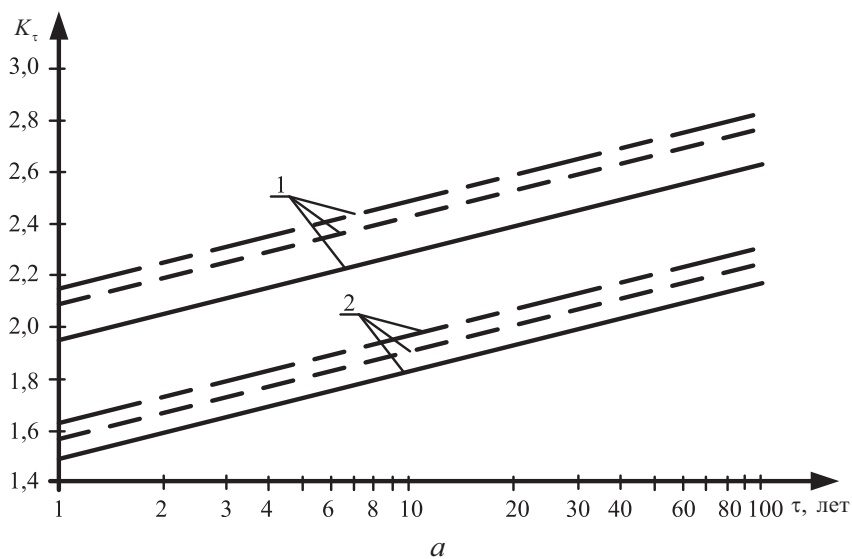


Рис. 1. Расчётная кратность перенапряжений K_τ , превышаемая в среднем 1 раз за τ лет на разомкнутом конце линий с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями без повторных пробоев (а), с повторными пробоями на ДВЛ 110 кВ (б) и с повторными пробоями на ДВЛ 220 кВ (в) при плановых включениях и успешных АПВ (1) и при плановых отключениях и отключениях к.з. (2). — усредненная кривая, — верхняя граница 95%-го доверительного интервала; - верхняя граница 90%-го доверительного интервала

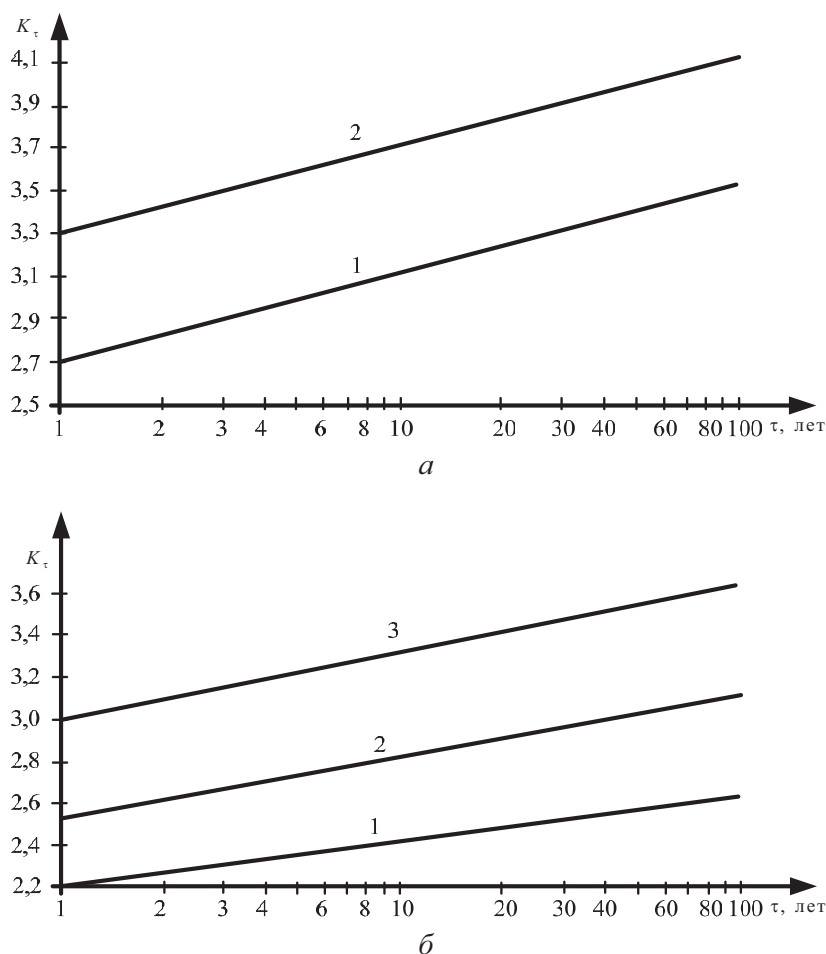


Рис. 2. Расчётная кратность перенапряжений K_{τ} , превышаемая в среднем 1 раз за τ лет на разомкнутом конце линий без трансформаторов и шунтирующих реакторов и с выключателями без опасных повторных зажигания (а) и допускающими повторные зажигания (б) при плановых включениях (1), при АПВ (2) и отключениях (3)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Халилов Ф.Х., Гольдштейн В.Г., Гордиенко А.Н., Пухальский А.А. Повышение надежности работы электрооборудования и линий 0,4–110 кВ нефтяной промышленности при воздействиях перенапряжений. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 356 с.
2. Бобров В.П., Гольдштейн В.Г., Халилов Ф.Х. Перенапряжения и защита от них в электрических сетях 110–750 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 216 с.
3. Гольдштейн В.Г. Статистические методы исследования электромагнитной совместимости электроустановок в электропитании от внешних атмосферных грозовых воздействий // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2002. – № 14. – С. 159–171.
4. Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г., Халилов Ф.Х. К вопросу о моделировании систем грозозащиты двухцепных ЛЭП 35–220 кВ // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 3. – С. 38–40.
5. Халилов Ф.Х. Перенапряжения в электрических сетях. Ч. 2. – СПб., 2004. – 75 с.

Поступила 24.01.2012 г.