

Демпфирование апериодической составляющей тока отключения линейных выключателей

КАЧЕСОВ В.Е.

Включение поперечно компенсированных линий электропередач (ЛЭП) сопровождается появлением апериодической компоненты в шунтирующих реакторах и, как следствие, в токах отключения линейных выключателей. В ЛЭП с высокой степенью компенсации зарядных токов линии апериодическая компонента препятствует приближению тока отключения к нулю в неповрежденных фазах линии за нормированное время, создавая задержку прерывания тока, которая может приводить к технологическим повреждениям. Изложены вероятностные аспекты возникновения нештатных отключений и известные методы снижения вероятности нештатного отключения линейных выключателей. Для эффективного подавления апериодического тока в самом источнике — шунтирующем реакторе, предложены новые устройства, основанные на включении в ветвь реактора (либо со стороны высокого, либо низкого напряжения) дополнительного демпфирующего резистора. Определены технические требования к демпфирующему резистору и уровню изоляции заземляющего вывода реактора.

Ключевые слова: линия электропередачи, автокомпрессионный выключатель, шунтирующий реактор, демпфирующий резистор, апериодическая составляющая тока

В ряде электрических сетей высокого и сверхвысокого напряжений приходится выполнять коммутации цепей (участков сетей) с параллельно включенными источником реактивной мощности, например батареи статических конденсаторов (БСК), и шунтирующего реактора (ШР) (рис. 1,а), т.е. параллельные L - C -контуры. В качестве естественного источника реактивной мощности вместо БСК может выступать протяженная воздушная или кабельная линия (ВЛ, КЛ). При необходимости быстрого отключения после включения такого присоединения, например по причине однофазного короткого замыкания (КЗ) на одной из трех фаз в отключаемом токе неповрежденных фаз, помимо вынужденной некомпенсированной составляющей тока (i_{\sim}) и свободной колебательной ($i_{\text{КОЛ}}$) присутствует медленно затухающая апериодическая компонента ($i_{\text{АП}}$), препятствующая прохождению тока через нуль и его успешному прерыванию выключателем. Особенностью современных высоковольтных выключателей автокомпрессионного типа является малое время охлаждения ствола дуги в дугогасительной камере, ограниченное временем движения подвижного контакта, которое, как правило, не превышает $\sim 2 \div 2,5$ периода промышленной частоты [1]. Из-за высокой добротности ШР и, соответственно, большой постоянной времени апериодической токовой компоненты (и большого соотношения $i_{\text{АП}}/(i_{\sim} + i_{\text{КОЛ}})$) интенсивное охлаждение канала между контактной дугой может прекращаться заметно раньше, чем достигается нуль тока отключения [2, 3, 7]. Последнее приводит к негашению

дуги, повреждению выключателя и технологическим нарушениям.

Далее рассматривается частный случай коммутации цепи с разнополярными источниками реактивной мощности — поперечно компенсированной линии электропередачи (ЛЭП). На рис.1,б в качестве примера представлены аварийные осциллограммы токов в линейных выключателях в цикле включение/быстрое отключение поперечно компенсированной линии электропередачи 750 кВ. Штатно произошло отключение только выключателя фазы B ; выключатель фазы C отключился (прервал ток) — с задержкой 245 мс; нештатное отключение полюса фазы A с приблизительно такой же задержкой нуля тока привело к повторным зажиганиям, разрушению выключателя и развитию аварии.

Апериодическая составляющая в токе отключения может иметь место в выключателях обеих неповрежденных фаз. Быстрое отключение первой неповрежденной фазы протекает принципиально в лучших условиях, чем второй. Это обусловлено тем, что резонанс токов в цепи линейного выключателя не может быть «глубоким» (значение тока не приближается к нулю) из-за наличия в токе отключения некомпенсируемой линейным трехлучевым ШР (трехфазной реакторной группой с глухо заземленной нейтралью) междуфазной емкостной вынужденной составляющей ($I_{\text{Ф.Ф}}$). Четырехлучевой линейный ШР, нейтраль трехфазной группы которого соединена с землей через компенсирующий реактор, компенсирует междуфазную емкостную проводимость линии электропередачи, но чет-

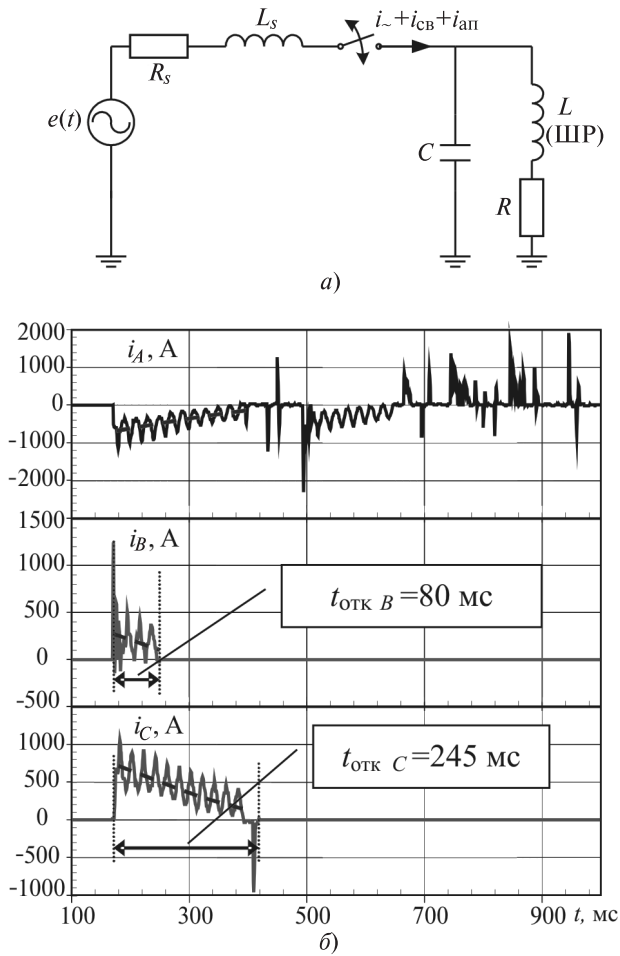


Рис. 1. Простейшая схема цепи, в которой возникают проблемы отключения из-за аperiodической компоненты тока отключения (а), и аварийные осциллограммы токов в линейных выключателях в цикле включение/быстрое отключение поперечно компенсированной линии электропередачи 750 кВ (б)

вертый луч (компенсирующий реактор) вводится в работу, как правило, только при однофазном автоматическом повторном включении.

Вынужденная составляющая тока в линейном выключателе второй по очереди отключаемой фазы приблизительно равна (применительно к фазе А):

$$I_{2\sim} \approx I_{\phi\sim} + I_{\phi} = U_{\phi} \times \left(\sqrt{3} e^{\pm j\frac{2}{3}\pi + j\frac{\pi}{2}} \omega C'_{\phi\sim} l + \frac{K_{\phi} - 1}{\omega L_{p\sim} K_{\phi}} e^{-j\frac{\pi}{2}} \right), \quad (1)$$

где U_{ϕ} — действующее фазное напряжение; $L_{p\sim} = L_{p\sim} / n_p$ — эквивалентная индуктивность ШР; $K_{\phi} = \frac{1}{\omega^2 L_{p\sim} (C'_{\phi} + C''_{\phi\sim})}$ — коэффициент ком-

пенсации эквивалентной (условно фазной) емкости линии длиной l ; C'_{ϕ} , $C''_{\phi\sim}$ — погонные фазная и междуфазная емкости линий; переменный знак в показателе степени первого слагаемого в скобках обусловлен тем, какая фаза повреждена.

Из-за различного направления векторов фазного и междуфазного токов в линейном выключателе даже при $K_{\phi} = 1$ протекает вынужденный ток, достигающий десятков ампер (для типичной длины ВЛ 500 кВ $l = 300 \div 600$ км), т.е. $I_{2\sim}$ принципиально не может быть полностью скомпенсирован. В соответствии с резонансной кривой (рис. 2,а) ток никогда не обращается в нуль ($I_{2\sim} \neq 0$), что положительно влияет на условия обрыва тока выключателем (ВЛ оснащена двумя ШР $S = 2 \cdot 180 = 360$ Мвар, устойчивое замыкание, $I_{ap\max} = 2S / 3U_{\phi\max}$).

Вынужденная составляющая тока отключения в последней (третьей по очереди) фазе ($I_{3\sim}$) в широком диапазоне длины линий (или мощности ШР) имеет две резонансные зоны, в которых ток стремится к нулю, что обусловлено существованием двух параллельных контуров, связанных междуфазной емкостью линии [3].

Теоретически, из-за резонанса напряжения в междуфазном контуре линии электропередачи существует незначительный диапазон длины линий (рис. 2,б), где ток линейного выключателя резко

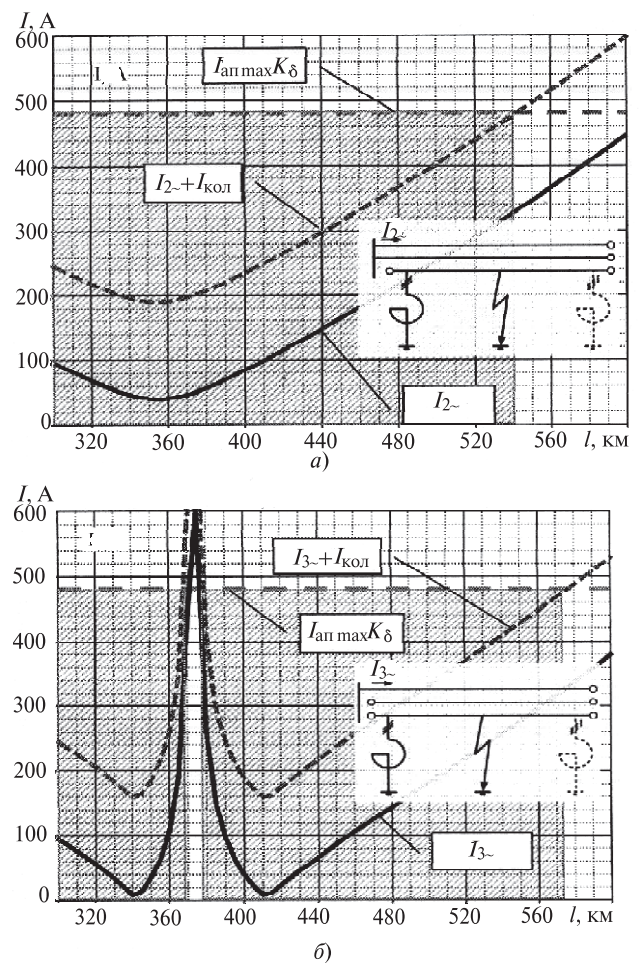


Рис. 2. Зависимость вынужденной составляющей тока отключения во втором (а) и последнем (б) отключаемом полюсе линейного выключателя от длины линии 500 кВ и диапазоны длины ВЛ (заштрихованная область), в которых возможно нештатное отключение ЛВ

возрастает. Однако из-за временной ограниченности процесса отключения и биения колебаний существованием такой области следует пренебречь. Несколько меньший диапазон потенциально опасной длины линий при отключении второй по очереди фазы (рис. 2,а) обусловлен указанной невозможностью полной компенсации вынужденной составляющей тока линии шунтирующим реактором.

На основе отношения апериодической компоненты к сумме вынужденной и колебательной могут быть построены области длины линий, в которых возможны нештатные отключения линейных выключателей.

На рис. 2 такие области построены для традиционных ВЛ 500 кВ. При их построении полагалось, что максимальный апериодический ток ($I_{\text{ап max}}$) ограничивается индуктивным сопротивлением электрической системы и линий. Последнее учитывается введением приближенно рассчитываемого поправочного коэффициента:

для одного ШР на удаленном конце линии

$$K_s = \frac{X_p}{X_s + X_p + X_L l};$$

для идентичных ШР на концах линии

$$K_s = \frac{X_p}{2[X_s + X_p(X_L l + X_p)] / (2X_p + X_L l)},$$

где X_L – погонное индуктивное сопротивление линии по прямой последовательности; $X_p = \omega L_p$ – индуктивное сопротивление реактора; $X_s = 0,1Z_{c1}$ – индуктивное сопротивление электрической системы; Z_{c1} – волновое сопротивление линии для прямой последовательности фазных напряжений.

К моменту времени штатного отключения ($t_{\text{отк}} \approx 60$ мс) апериодическая компонента дополнительно затухает, что учитывается с помощью коэффициента затухания $K_\delta = 0,85$, который, как правило, находится в диапазоне от 0,83 до 0,93.

Колебательная составляющая тока отключения, которая формируется как в момент включения линии, так и в момент прерывания тока КЗ в поврежденной фазе, зависит, в основном, от параметров примыкающей системы, длины линии, места КЗ на линии; ее начальное значение может достигать $\sim 300 \div 350$ А [2, 3]. Для получения незаниженного диапазона потенциально опасной длины ВЛ далее колебательная компонента ограничена значением $I_{\text{кол}} = 150$ А.

Вероятность нештатного отключения. Процесс прерывания тока отключения имеет случайный характер, в основном, из-за неопределенности фазы включения. Вероятность нештатного отключения в единичной коммутации можно оценить как

$$P_{\text{н.о}} = 1 - \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{I_{\sim} + I_{\text{кол}}}{I_{\text{ап max}} K_\delta K_s} \right),$$

$$\forall (I_{\sim} + I_{\text{кол}}) \leq |I_{\text{ап max}} K_\delta K_s|. \quad (3)$$

Выражение (3) справедливо для случая наибольшей энтропии фазы включения, т.е. угол включения контактов выключателя подчинен закону равномерной плотности в диапазоне $\varphi \in [-\pi, +\pi]$. Такое предположение дает незаниженную оценку вероятности нештатного отключения линейного выключателя.

Расчетные зависимости вероятности нештатного отключения линейных выключателей (в единичной коммутации) от длины линии 500 кВ показаны на рис. 3. Они имеют «инверсный» характер по отношению к резонансным кривым, приведенным на рис. 2. Очевидно, что сумма колебательных составляющих тока отключения $I_{\sim} + I_{\text{кол}}$ способствует снижению вероятности нештатного отключения. При увеличенной колебательной составляющей $I_{\text{кол}} = 300$ А вероятности нештатного отключения с одним ШР равны нулю, а при двух ШР на ВЛ вероятность и диапазоны длины линий заметно уменьшаются (рис. 2).

Более достоверная оценка вероятности нештатного отключения линейных выключателей в цикле включение/быстрое отключение на конкретной линии электропередачи выполняется при применении метода статистических испытаний, который реализован в большинстве программ моделирования электромагнитных переходных процессов (например, с помощью SPICE- и EMTP-клонов [4, 5]). К примеру, для линии электропередачи 500 кВ с параметрами $Z_{c1} = 289$ Ом, $l = 400$ км, $X_0 / X_1 = 27/22$ Ом расчетное значение $P_{\text{н.о}} = 0,42$ применительно к коммутации планового включения линии.

Способы снижения вероятности нештатного отключения ЛВ. Разновременное включение/отключение полюсов выключателя поврежденной фазы и неповрежденных фаз [2, 6]. Поскольку сверхток (ток КЗ) имеет место только в одной фазе, полюса неповрежденных фаз могут включаться-отключаться с задержкой, приближенно определяемой по выражению

$$t_{\text{зд}} \approx \tau \ln \left(\frac{K_s K_\delta I_{\text{ап max}}}{I_{\sim}} \right), \quad \forall (K_s K_\delta I_{\text{ап max}}) \geq I_{\sim}, \quad (4)$$

где τ – эквивалентная (для случая двух ШР на концах линии) постоянная времени затухания апериодического тока.

Такой алгоритм отключения может быть реализован во всех современных системах релейной защиты и автоматики.

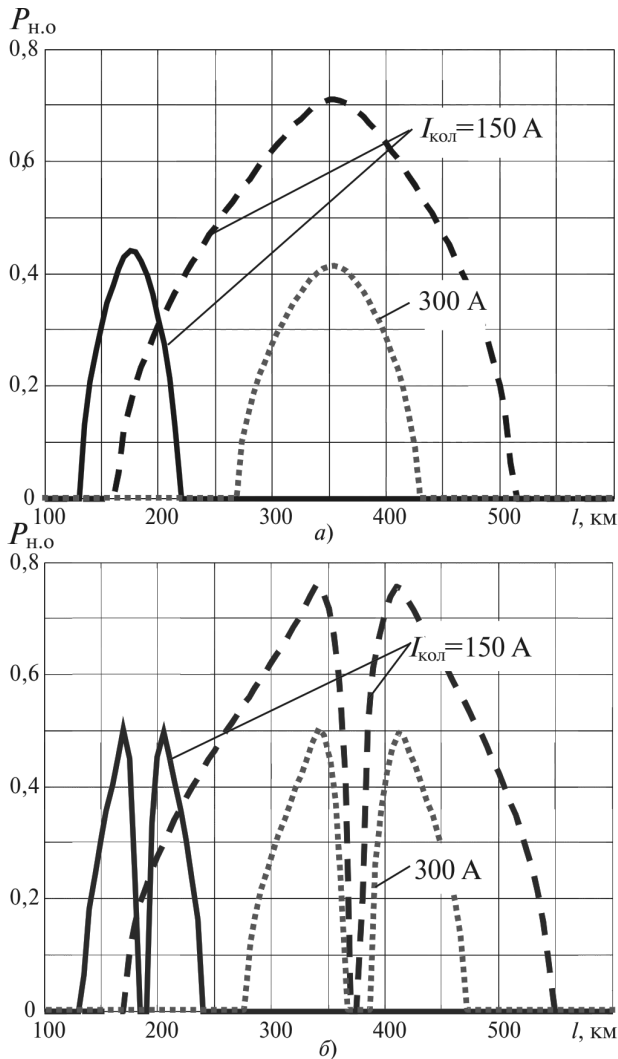


Рис. 3. Вероятности нештатного отключения второго (а) и третьего (б) полюса линейного выключателя на линии 500 кВ с одним (—) и двумя (- - -) ШР; ... - $I_{кол} = 300$ А, два ШР

Предварительное отключение части шунтирующих реакторов перед включением линии снижает соотношение $I_{ап} / I_{\sim}$ и вероятность нештатного отключения.

Применение синхронного (управляемого) включения линейных выключателей [2, 3, 7] с фазами, близкими к $\varphi = \pm 90^\circ$ ($u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$), минимизирует аperiodическую составляющую тока отключения (в заметной степени при плановом включении).

Использование выключателей с предвключаемым резистором ($R_{пр}$) [2, 3, 7, 8]. Основные недостатки такого способа состоят в выделении в предвключенном резисторе значительной энергии при включении на КЗ и невозможность полного затухания аperiodической токовой компоненты к потенциальному времени прерывания тока отключения $t_{отк} \approx 60$ мс.

Сопротивление предвключаемого резистора должно быть оптимизировано под конкретную линию электропередачи. На рис. 4 показана зависимость аperiodической компоненты тока отключе-

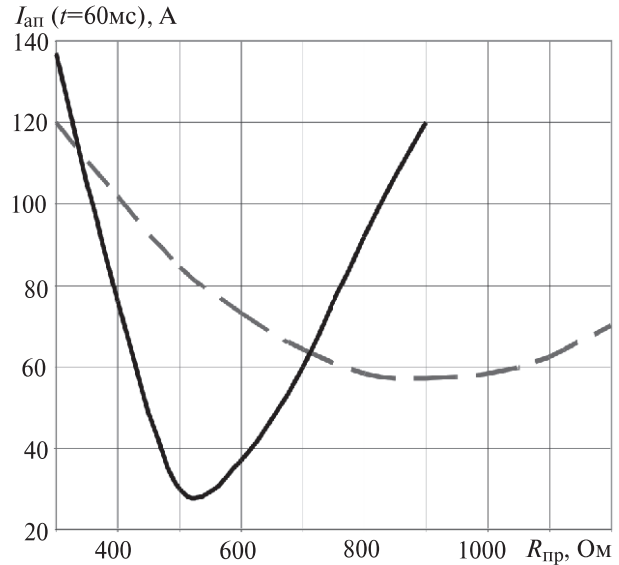


Рис. 4. Зависимость аperiodической компоненты тока от сопротивления предвключенного резистора в линейном выключателе в момент времени $t_{отк} \approx 60$ мс после включения линии (ВЛ 500 кВ, $l = 400$ км); - - - - один ШР; — — два ШР

ния от сопротивления предвключаемого резистора. Оптимальные значения составляют: $R_{пр.опт} = 500 \div 550$ Ом для ВЛ с двумя ШР и $R_{пр.опт} = 800 \div 1000$ Ом — для ВЛ с одним ШР.

При трехфазном автоматическом повторном включении (ТАПВ) в ШР остается ток I_{p0} , который может суммироваться с аperiodической компонентой, формируемой в момент включения линии ($I_{ап} \sim U_{фmax} / X_{р.э} \cos(\varphi) + i_{p0}(t_{вкл})$), поэтому условия прерывания тока линейными выключателями в случаях отключения КЗ после неуспешного ТАПВ могут заметно ухудшаться и эффективность перечисленных способов падает. Из-за высокой добротности поперечно компенсированной ЛЭП влиянием остаточного тока ШР на процесс отключения линии можно полностью пренебречь лишь при длительности бестоковой паузы $t_{ТАПВ} > 4$ с.

Демпфирование аperiodической составляющей в шунтирующем реакторе. Включение демпфирующего резистора на стороне высокого напряжения. В отличие от изложенного способа подавления аperiodической составляющей тока в линейном выключателе посредством предвключаемого резистора в выключателе демпфирование $i_{ап}$ может эффективно выполняться резистором, непосредственно включенным в цепь шунтирующего реактора. На таком принципе разработано два устройства [9, 10], отличающиеся местом установки демпфирующих резисторов $R_{д}$.

В устройстве, однолинейная схема которого приведена на рис. 5,а, демпфирующий резистор $R_{д}$ устанавливается на стороне высокого напряжения [10]. Он включен между выводом высоковольтного выключателя 2 и ШР 1. Параллельно демп-

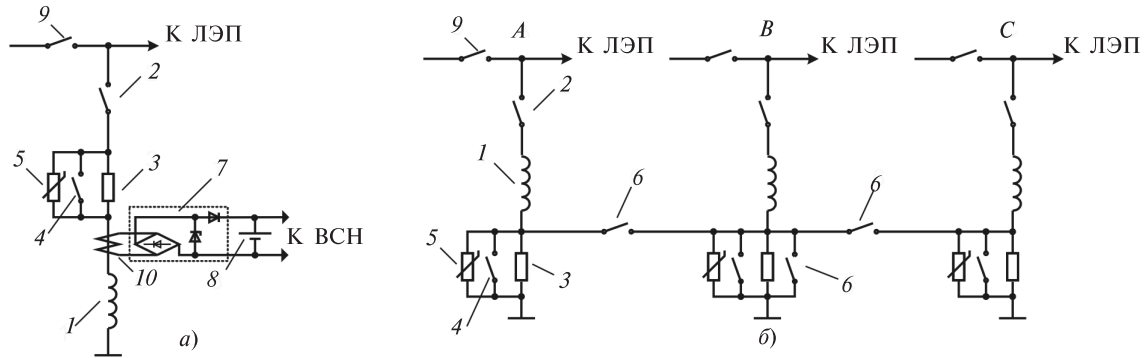


Рис. 5. Электрические схемы устройств для подавления аperiodической компоненты в токе ШР и линейном выключателе: а – демпфирующий резистор включен на стороне высокого напряжения; б – к заземляющему выводу ШР

фирующему резистору подключены выключатель среднего напряжения (ВСН) 4 (с рабочим напряжением до 35 кВ) и нелинейный ограничитель перенапряжений (ОПН) 5. На проводе, соединяющем резистор с ШР, установлен трансформатор тока (ТТ) 10, заряжающий через выпрямительный блок 7 аккумулятор 8, предназначенный для питания цепи управления ВСН; 9 – линейный выключатель. Управление ВСН осуществляется по оптоволоконному кабелю.

Сопротивление демпфирующего резистора R_d рассчитывается из условия эффективного затухания аperiodической составляющей в ШР за время цикла включение/отключение современных ЭВ. Завышенная оценка сопротивления демпфирующего резистора получается в соответствии с выражением

$$R_d \approx 3L_p / t_{отк}. \tag{5}$$

Далее рассматривается случай установки ШР на конце линии. В нормальном состоянии выключатель ВСН включен. При трехфазном включении линии электропередачи (плановое включение, ТАПВ) за ~200 мс до подачи команды на включение линейного выключателя по телеканалу подается команда на отключение ВСН. Поэтому к моменту включения линейного выключателя контакты ВСН уже разомкнуты. После отключения ВСН автоматически включается с временной задержкой $t_{R_d} \approx 300$ мс и шунтирует демпфирующий резистор R_d . За время отключенного состояния ВСН аperiodическая составляющая в токе ШР (и в линейном выключателе) затухает, что позволяет успешно отключать линию линейным выключателем в течение 60 мс после ее включения.

Для реальной электропередачи благодаря известному расчетному соотношению $I_{ап max} / I_{\sim}$ сопротивление R_d , определенное по (5), может быть заметно снижено. Так, для случая установки одного ШР в конце включаемой линии сопротивление R_d с учетом возможности выполнения на линии

ТАПВ ($I_{p0} \neq 0$) определяется из решения системы нелинейных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} R_d &= \frac{(L_p + L_{вл})}{t_{отк}} \ln \left(\frac{K_s I_{ап max} + I_{p0}^*}{\sqrt{2} I_{\sim min} + I_{кол min}} \right) - R_{вл} - R_p; \\ I_{p0}^* &\cong I_{p0} e^{-0,2/\tau_R}, \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

где $I_{p0} \approx I_{p,ном} \sqrt{2} K_б e^{\frac{0,2-t_{ТАПВ}}{\tau_0}}$; $\tau_0 \approx 2 \frac{L_p + L_{вл}}{R_{вл} + R_p}$;

$\tau_R \approx 2 \frac{L_p + L_{вл}}{R_{вл} + R_p + R_d}$; $K_б \approx 1,2$ – коэффициент бие-

ния свободных колебаний во время бестоковой паузы ТАПВ.

Колебательная свободная составляющая тока, возникающая в момент включения линии ($i_{кол.вкл}$) имеет относительно слабое затухание. Основные потери на типичных частотах свободных колебаний ($f_{кол0} = 150 \div 300$ Гц) сосредоточены, в основном, в ВЛ ($P_{вл} \gg P_{Rd}$). При фазе включения, близкой к нулю ($\varphi = 0$), когда аperiodическая компонента тока включения $i_{ап}$ максимальна, а колебательная ($i_{кол.вкл}$) – минимальна, начальная амплитуда последней $I_{кол.вкл0}$ приблизительно равна зарядному току линии. Остаточная амплитуда колебаний к моменту потенциального прерывания тока $t_{отк} \approx 60$ мс) оценивается как

$$I_{кол.вкл min} \approx U_{ф max} \omega C_1 e^{\frac{-t_{отк} R_1}{2L_1}}, \tag{7}$$

где L_1, C_1, R_1 – первичные параметры линии для прямой последовательности фазных напряжений.

Минимальное значение $I_{кол.вкл min} = 0,10 \div 0,15 I_{кол.вкл0}$ и для линий 500 кВ типичной длины $l = 300 \div 500$ км равно $60 \div 100$ А. Минимальная колебательная составляющая тока отключения ($I_{кол.вкл min}$), инициируемая обрывом тока КЗ в поврежденной фазе, имеет приблизительно такое

же значение. Поэтому к вынужденной составляющей $I_{\sim \min}$ в выражении (6) добавляется минимальная свободная колебательная составляющая $I_{\text{кол} \min}$. Следует отметить, что в общем случае эта компонента тока отключения не может суммироваться алгебраически с вынужденной компонентой: для этого необходимо выполнение условия $\beta_{\text{кол}0} \gg \omega$. В маловероятных ситуациях свободная составляющая может иметь противоположную фазу колебания по отношению к колебанию вынужденной составляющей тока вблизи нулевого значения, несколько снижая итоговый размах колебания и затягивая отключение линии электропередачи. Поэтому для глубокой минимизации R_d может потребоваться детальное численное моделирование переходного процесса отключения ЛЭП. Неучет $I_{\text{кол} \min}$ ($I_{\text{кол} \min} = 0$) приводит к несколько завышенному расчетному значению R_d .

Энергия, рассеиваемая в демпфирующем резисторе R_d во время ТАПВ:

$$E_{R_d} \approx R_d \left[\int_0^{t_{\text{отк}}} I_{p0} \sin(\beta t) e^{-\frac{t}{\tau R}} dt + \int_0^{t_{\text{отк}}} \left(\frac{U_{\text{фmax}}}{Z} \left(\sin(\omega t) + S e^{-\frac{t}{\tau}} \right) dt + \left(\frac{I_{\text{св}}}{2} \right)^2 (0,1 - t_{\text{отк}}) \right] \right] \quad (8)$$

где $Z = \sqrt{R_d^2 + (\omega L_p)^2} \approx \omega L_p$; $S = 1 + \frac{I_{p0}^*}{\sqrt{2} I_{p.\text{ном}}}$;

$\tau \approx (L_p + L_{\text{вл}}) / (R_p + R_{\text{вл}} + R_d)$.

Последнее слагаемое в (8) обусловлено свободным током в ШР и R_d , имеющим форму биения колебаний после отключения линии. Из-за случайности процесса прерывания тока точное определение энергии, вводимой в демпфирующий резистор на этом временном интервале, затруднено. В качестве действующего значения тока принята половина его начального значения:

$$I_{\text{св}} \approx \frac{K_{\text{св}} U_{\text{фmax}} Y_C}{n_p},$$

где $Y_C = \sqrt{\frac{(C'_{\text{ф}} + C'_{\text{ф.ф}}) l}{L_{\text{р.э}}}}$ – характеристическая проводимость фазного контура ЛЭП (при устойчивом КЗ на одной из фаз); $K_{\text{св}} \approx 1,1$ – коэффициент, учитывающий присутствие остаточных свободных колебаний в момент времени $t_{\text{отк}}$.

После интегрирования (8) с учетом $Z \approx \omega L_p$, $\omega = 100\pi$, $t_{\text{отк}} = 60$ мс и введения ограничения $k = \pi t > 0,1$ выражение для E_{R_d} принимает вид:

$$E_{R_d} \approx \frac{L_p}{2} (I_{p0}^2 - I_{p0}^{*2}) + R_d \left\{ \frac{I_{\text{р.ном}}^2}{50\pi} \times \left[2S(1 + 25Sk) + 3\pi - 2S \left(e^{-\frac{0,06}{\tau}} + 25Ske^{-\frac{0,12}{\tau}} \right) \right] + (0,1 - t_{\text{отк}}) \frac{I_{\text{св}}^2}{4} \right\} \quad (9)$$

В качестве демпфирующих могут применяться, например, резисторы из электротехнического бетона, энергоемкость которых достигает единиц МДж. Бетэловый резистор сопротивлением 70÷77 Ом, предназначенный для выключателей серии ВВН и рассчитанный на цикл коммутаций в соответствии с ГОСТ 687–68, обладает номинальной энергоемкостью $E_{\text{ном}} = 1,6$ МДж, предельная энергоемкость – $E_{\text{max}} = 4,9$ МДж [11].

При повторном включении в цикле ТАПВ благодаря предварительному вводу (перед включением линейного выключателя) демпфирующего резистора последовательно с ШР существенно затухают

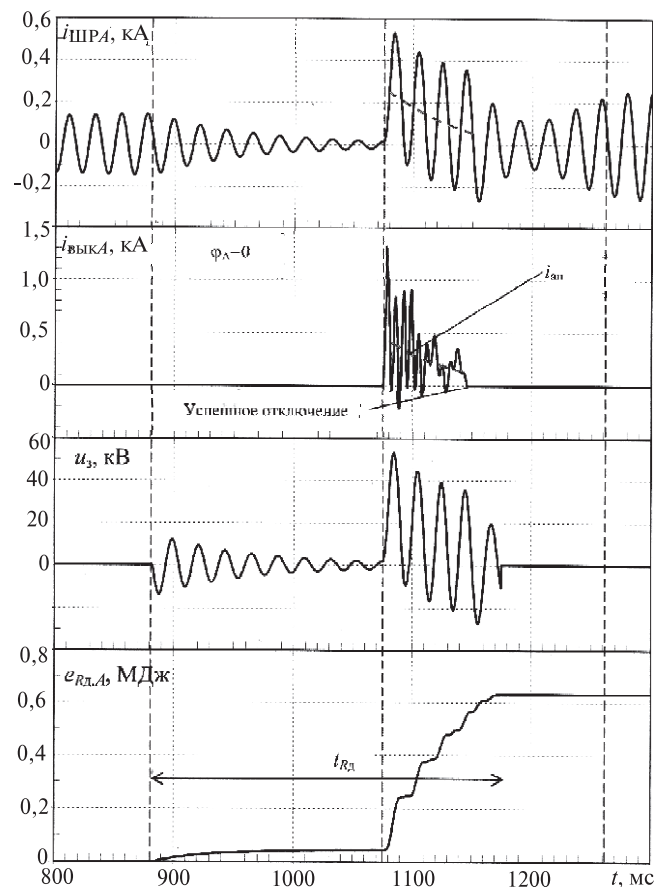


Рис. 6. Осциллограммы тока в ШР, линейном выключателе, напряжения на заземляющем выводе ШР и энергии, рассеиваемой в R_d при включении-отключении ЛЭП в цикле ТАПВ ($t_{\text{ТАПВ}} \approx 1$ с); ШР оснащены демпфирующими резисторами ($l = 407$ км; $Q_{\text{ШР}} = 2 \times 180$ Мвар; $I_{p0} = 144$ А; $I_{p0}^* = 17$ А; $R_d = 100$ Ом; $t_{R_d} = 300$ мс)

свободные колебания в ЛЭП (рис. 6). Поэтому начальное/остаточное напряжение на линии к моменту коммутации радикально снижается, происходит «мягкое» включение ЛЭП с малой переходной компонентой и коммутационными перенапряжениями, что повышает надежность постановки ее под напряжение благодаря снижению электрических перегрузок на изоляции.

Подключение демпфирующего резистора к заземляющему выводу ШР. Включение демпфирующего резистора 3 к заземляющему выводу ШР 1 упрощает схему устройства подавления аperiodической компоненты тока (рис. 5,б). В устройстве на рис. 5,б в случае маловероятного отказа выключателя 4 на включение на заземляющем выводе ШР возникает напряжение, ограниченное только ОПН 5, время работы которого определяется его вольт-временной характеристикой. Для многократного (на несколько порядков) повышения надежности устройства применяются два выключателя, один из которых 4 шунтирует демпфирующие резисторы, а второй 6, дублируя первый, формирует нейтраль трехфазной реакторной группы и заземляет ее в случае отказа первого.

Максимальное мгновенное (коммутационное) напряжение на демпфирующем резисторе и на заземляющем выводе ШР определяется как суперпозиция аperiodической, вынужденной и свободной колебательной компонент, возникающих в конце ЛЭП после ее включения. С учетом того, что максимальное напряжение на ШР $U_{ШР\max} < 2U_{\phi\max}$, напряжение на заземляющем выводе ШР составит:

$$U_3 < U_{\phi\max} R_d \left(\frac{1}{Z_{LR0}} \sin \varphi + \frac{1 + \cos \varphi}{Z} \right), \quad (10)$$

где $Z_{LR0} = \sqrt{(\omega_0 L_p)^2 + R_d^2}$;

$$\omega_0 \approx \left[\frac{L_p(L_s + L_1)}{L_s + L_1 + L_{Lp}} \frac{C_{ВЛ}^*}{2} \left(1 + \frac{L_s}{L_s + L_1} \right) \right]^{-0,5};$$

$$C_{ВЛ}^* = C_{\phi} + 2C_{\phi,\phi}.$$

Дифференцируя выражение под знаком модуля из (10) по φ и приравнявая его нулю, решением полученного уравнения $f(\varphi) = 0$ получаем фазу максимального перенапряжения:

$$\varphi_{\max} = \arctan(Z / Z_{LR0}).$$

Для реальных значений R_d , не превышающих ~ 200 Ом, $\varphi_{\max} \approx \arctan(\omega / \omega_0)$.

После подстановки $\varphi = \varphi_{\max}$ в (10) получаем максимальное напряжение U_3 для конкретных параметров электропередачи и ШР.

Для линий электропередачи 500 кВ длиной 300÷500 км с реакторами мощностью $Q_{ШР} \approx 180$ Мвар и $R_d < 200$ Ом напряжение $U_3 < 115$ кВ (амплитудное значение), которое допустимо для заземляющего вывода ШР с классом изоляции 35 кВ.

На рис. 6 представлены расчетные токи в ШР и линейных выключателях неповрежденных фаз при ТАПВ ЛЭП 500 кВ, оба линейных ШР которой (в начале и конце ВЛ) оснащены демпфирующими резисторами. Выполняется успешное отключение ЛЭП за время 60 мс. При моделировании переходных процессов принималось $R_d = 100$ Ом, полученное с учетом минимальной переходной колебательной компоненты $I_{св\min} = 60$ А (без ее учета $R_d = 135$ Ом). Энергия, выделяемая в демпфирующем резисторе и слабо зависящая от длительности бестоковой паузы ТАПВ, не превышает $E_{Rd} < 650$ МДж (расчет с использованием (9) дает $E_{Rd} = 680$ кДж). Значение E_{Rd} много меньше $E_{ном}$ (и E_{\max}), поэтому указанные бетэловые резисторы способны с достаточной надежностью поглощать энергетические импульсы при трехфазных включениях ЛЭП. Максимальное напряжение на заземляющем выводе ШР вполне допустимо и не превышает 55 кВ (рис. 6).

Выводы. 1. Линейные выключатели автокомпрессионного типа, предназначенные для коммутации поперечно компенсированных ЛЭП со значительной степенью компенсации зарядной мощности, не удовлетворяют требованию быстрого прерывания тока за нормированное время. Для минимизации вероятности нештатного отключения выключателей могут применяться следующие способы:

- предварительное отключение ШР;
- разновременное включение-отключение полюсов выключателя;
- управляемое (синхронизированное) включение;
- применение выключателей с предвключаемыми резисторами.

2. Эффективное подавление аperiodической компоненты тока отключения и успешное включение-отключение ЛЭП в течение 60 мс можно выполнить введением на 300 мс в цепь с ШР демпфирующих резисторов, которые могут подключаться как на стороне высокого напряжения, так и к заземляющему выводу ШР.

3. Требование по энергоемкости к демпфирующим резисторам не является критическим. Они могут быть выполнены, например, из недорогого электротехнического бетона. При подключении демпфирующих резисторов к заземляющему выводу ШР коммутационные перенапряжения незначительны, а требования к уровню изоляции вполне выполнимы.

4. Дополнительным преимуществом применения демпфирующих резисторов в цепи ШР явля-

ется снижение остаточного заряда на ЛЭП, что приводит к снижению среднестатистической кратности коммутационных перенапряжений при ТАПВ и более надежной постановке линии под напряжение.

Автор выражает благодарность АО ФСК «ЕЭС» за предоставленные осциллограммы аварийных отключений ЛЭП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kapetanovic M.** High Voltage Circuit Breakers. — Sarajevo, 2011.
2. **Kachesov V.E., Kachesov D.V.** Requirements for Switching Algorithms of EHV Shunt Compensated OHL by SF₆ Circuit Breakers. — Proc. of the Intern. Conf. on Power Systems Transients (IPST–2011), Delft (the Netherlands), 14–17 June 2011, No. 128.
3. **Качесов В.Е., Качесов Д.В.** О негативном влиянии аperiodической составляющей на отключение линейных выключателей. — Электричество, 2012, № 9, с. 31–38.
4. **Banzhaf W.** Computer aided circuit analysis using SPICE. — Prentice Hall, 1989, 340 p.
5. **Alternative** Transients Program Rule Book. — Leuven, 1987, 860 p.
6. **Патент РФ 2358368.** Способ включения трехфазной линии электропередачи/А.И. Левиуш, В.М. Стрелков, Г.Г. Фокин, А.А. Шурупов. — БИ, 2009, № 16.
7. **Da Silva F.F., Bak C.L., Gudmundsdottir U.S., Wiechowski W., Knardrupgard M.R.** Methods to minimize zero-missing

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 11, pp. 12–19.

Suppression of Aperiodic Component in Interrupted Current of Line Circuit Breakers

KACHESOV Vladimir Yegorovich (*Scientific-Production Enterprise «ENERGOKONSALT», Novosibirsk, Russia*) — *Leading Specialist, Professor of Novosibirsk State Technical University*

The planned energization (and auto-reclosing) of shunt compensated transmission lines (SCTLs) is accompanied by appearance of an aperiodic current component in shunt reactors and, as a consequence in interrupted currents of line circuit breakers. In SCTLs with high compensation of line charging currents the aperiodic component prevents the approach of interrupted current to zero in non-damaged phases for normalized time, creating a current interruption delay which may lead to technological disturbances. The article describes some probability aspects of occurrence of abnormal line disconnection and known methods of decreasing the probability of abnormal switching off of puffer-type line circuit breakers. New devices are proposed for effective suppression of aperiodic current in the source itself — shunt reactor, that are based on the connection into reactor's branch (either from high or from low voltage side) of an additional damping resistor. Technical requirements are defined for damping resistor and insulation level of reactor grounding terminal.

Key words: *transmission line, circuit breaker, current shunt reactor, damping resistor, aperiodic component*

REFERENCES

1. **Kapetanovic M.** High Voltage Circuit Breakers. — Sarajevo, 2011.
2. **Kachesov V.E., Kachesov D.V.** Requirements for Switching Algorithms of EHV Shunt Compensated OHL by SF₆ Circuit Breakers. — Proc. of the Intern. Conf. on Power Systems Transients (IPST–2011), Delft (the Netherlands), 14–17 June 2011, No. 128.
3. **Kachesov V.E., Kachesov D.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2012, No. 9, pp. 31–38.
4. **Banzhaf W.** Computer aided circuit analysis using SPICE. — Prentice Hall, 1989, 340 p.
5. **Alternative** Transients Program Rule Book. — Leuven, 1987, 860 p.
6. **Patent RF No. 2358368.** Sposob vklyucheniya trekhfaznoi linii elektroperechachi (A method of incorporating a three-phase line power)/A.I. Leviush, V.M. Strelkov, G.G. Fokin, A.A. Shurupov. Bulletin of inventions, 2009, No. 16.
7. **Da Silva F.F., Bak C.L., Gudmundsdottir U.S., Wiechowski W., Knardrupgard M.R.** Methods to minimize zero-missing

phenomenon. — IEEE Trans. Power Delivery, Oct. 2010, vol. 25, pp. 2923–2930.

8. **Wijesinghe S., Kariyawasam K.K.M.A., Jayasekera B., at all.** Transients Following the Energizing of High Voltage AC Cables with Shunt Compensation. — Proc. IPST–2013. Vancouver (Canada), 18–20 July 2013.

9. **Патент РФ** на полезную модель № 117707. Устройство подавления аperiodической составляющей в токе линейного выключателя/В.Е. Качесов. — БИ, 2012, № 18.

10. **Патент РФ** на полезную модель № 118490. Устройство демпфирования аperiodической составляющей в токе линейного выключателя/В.Е. Качесов. — БИ, 2012, № 20.

11. **Врублевский Л.Е., Зайцев Ю.В., Тихонов А.И.** Силовые резисторы. — М.: Энергоатомиздат, 1991, 256 с.

[31.07.2016]

А в т о р: Качесов Владимир Егорович в 1981 г. окончил Новосибирский электротехнический институт (ныне Новосибирский государственный технический университет). В 2008 г. в Томском политехническом университете защитил докторскую диссертацию «Однофазные повреждения в электрических сетях среднего и высокого классов напряжения. Теория, методы исследований и меры предотвращения повреждений». Ведущий специалист НПП «ЭНЕРГО-КОНСАЛТ», профессор НГТУ.

phenomenon. — IEEE Trans. Power Delivery, Oct. 2010, vol. 25, pp. 2923–2930.

8. **Wijesinghe S., Kariyawasam K.K.M.A., Jayasekera B., at all.** Transients Following the Energizing of High Voltage AC Cables with Shunt Compensation. — Proc. IPST–2013. Vancouver (Canada), 18–20 July 2013.

9. **Patent RF na poleznuyu model' No. 117707.** *Ustroistvo podavleniya aperiodicheskoi sostavlyayushchei v toke lineinogo vyklyuchatelya* (Utility patent RF No. 117707. Suppression device DC component in the current line switch)/V.E. Kachesov. Bulletin of inventions, 2012, No. 18.

10. **Patent RF na poleznuyu model' No. 118490.** *Ustroistvo dempfirovaniya aperiodicheskoi sostavlyayushchei v toke lineinogo vyklyuchatelya* (Utility patent RF No. 118490. Suppression device DC component in the current line switch)/V.E.Kachesov. Bulletin of inventions, 2012, No. 20.

11. **Vrublevskii L.E., Zaitsev Yu.V., Tikhonov A.I.** *Silovyye rezistory* (Power resistors). Moscow, Energoatomizdat, 1991, 256 p.