

О негативном влиянии аperiodической составляющей тока на отключение линейных выключателей¹

КАЧЕСОВ В.Е., КАЧЕСОВ Д.В.

Включение поперечно-компенсированных линий электропередачи сверхвысокого напряжения сопровождается появлением аperiodической компоненты в токах линейных выключателей, которая препятствует достижению током нулевого значения в выключателях неповрежденных фаз, что приводит к задержке прерывания тока. Свободная колебательная компонента, возникающая в момент отключения тока короткого замыкания, также влияет на процесс прерывания линейного тока в неповрежденных фазах. Предложен подход для оценки свободных токов, возникающих при отключении короткого замыкания и способствующих успешному отключению линейных выключателей неповрежденных фаз. Появление аperiodической компоненты во время отключения тока имеет статистическую природу, поэтому обоснованный подход к выбору специальных способов отключения линии должен базироваться на вероятностном анализе переходного процесса включения/быстрого отключения линии. На основе выполненных исследований предложены способы подавления аperiodической компоненты тока в линейных выключателях.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, элегазовый выключатель, ток, аperiodическая компонента, шунтирующий реактор, задержка отключения

Включение поперечно-компенсированных линий электропередачи сверхвысокого напряжения сопровождается появлением в токе линейных выключателей свободной аperiodической компоненты $i_{ап}$, определяемой, в основном, мощностью шунтирующего реактора $Q_{ШР}$ и фазой включения линейного выключателя j . Вынужденная составляющая линейного тока I_{\sim} при больших (близких к единице) коэффициентах компенсации рабочей емкости линии K_p незначительна, поэтому для некоторых линий $I_{ап\max} > \sqrt{2}I_{\sim}$. Работа линий с $K_p \gg 1$ осложняет также процесс однофазного автоматического повторного включения из-за возможности развития резонанса напряжений на отключенной фазе [2, 3].

Operations for switching extra high-voltage power lines equipped with shunting compensation devices entail the generation of aperiodic component in the currents of line circuit breakers, which prevents the instantaneous currents in the circuit breakers of healthy phases from reaching zero, due to which the current is interrupted with a time delay. The free oscillating component that arises at the moment of interrupting a short-circuit current also affects the interruption of line currents in the healthy phases. An approach is proposed for estimating the free currents arising during the short-circuit fault clearance process, which facilitate successful interruption of current by the line circuit breakers of healthy phases. The aperiodic component arising during the current interruption process has a random nature, due to which a sound approach to selection of special methods for disconnecting a power line must be based on a probabilistic analysis of the transient triggered by the sequence involving connection and fast disconnection of the power line. Methods for suppressing the aperiodic component of current in line circuit breakers are proposed on the basis of the performed studies.

Key words: overhead power line, SF6 circuit breaker, current, aperiodic component, shunting reactor, delay of interruption

При быстром отключении линии электропередачи в результате включения на короткое замыкание (КЗ) при плановой постановке линии под напряжение или при трехфазном автоматическом повторном включении (ТАПВ) аperiodическая составляющая в неповрежденных фазах препятствует прохождению тока через нулевое значение и гашению дуги, что может приводить к «нештатным»/аномальным отключениям и возникновению технологических нарушений. Выключатель в таких режимах отключает квазипостоянный ток. На рис. 1 в качестве примера приведена осциллограмма аварийного режима, в котором произошло неотключение линейного выключателя фазы А в линии электропередачи 500 кВ.

Процессы при отключении линейного выключателя. В общем случае в токе отключения линейного выключателя неповрежденной фазы присутствуют три составляющие: вынужденная (i_{\sim}) и

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на Международной конференции по переходным процессам в электрических системах [1].

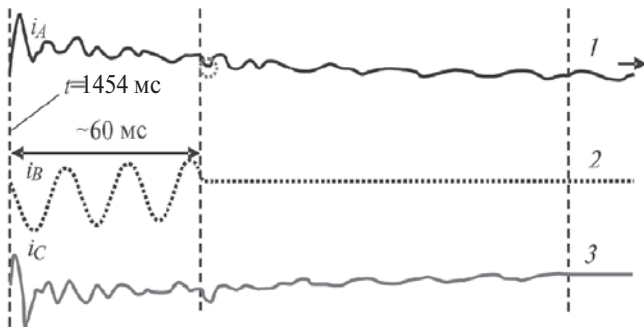


Рис. 1. Задержки прерывания тока в линейных элегазовых выключателях при отключении в цикле неуспешного ТАПВ поперечно-компенсированной линии 500 кВ: 1 – неотключение фазы А; 2 – прерывание тока в поврежденной фазе В, $t=15/3$ мс; 3 – то же в неповрежденной фазе С, $t=1628$ мс

свободные – аperiodическая и колебательная (периодическая), т.е. $i = i_{\sim} + i_{\text{ап}} + i_{\text{к}}$.

Оценка вынужденной составляющей тока отключения. В режиме симметричного одностороннего включения вынужденная составляющая тока определяется по выражению

$$I_{\sim} = U[Y_{R1} + (C + AY_{R2})(A + BY_{R2})^{-1}], \quad (1)$$

где $A = \text{ch}(gl)$; $B = Z_C \text{sh}(gl)$; $C = Z_C^{-1} \text{sh}(gl)$; Z_C и g – волновое сопротивление и коэффициент распространения линии (по прямой последовательности); $Y_{R1(2)}$ – проводимости шунтирующих реакторов в начале (индекс «1») и конце линии (индекс «2»).

После отключения линейным выключателем тока в поврежденной фазе имеет место пофазная несимметрия, поэтому (1) может применяться только для оценочных расчетов.

В наиболее вероятном аварийном режиме отключения однофазного (устойчивого) КЗ ток в последней отключаемой (неповрежденной) фазе в линии с двумя ШР, установленными на концах ВЛ, приближенно определяется как

$$I_{\sim} = U(p)Y(p) = U(p) \frac{aL^2 + bL + 4}{L^2c + Ld} = U(p) \frac{N(L)}{D(L)},$$

где $a = (C_{\phi}^2 + C_{\phi.\phi}^2 + 3C_{\phi}C_{\phi.\phi})p^4$;

$b = (4C_{\phi} + 6C_{\phi.\phi})p^2$; $c = (C_{\phi} + C_{\phi.\phi})p^3$; $d = 2p$; $Y(p)$ – входная операторная проводимость неповрежденной фазы ЛЭП; $p = jw$; $w = 100p$;

$L @ L_{\text{ШР}} + \frac{1}{2w} Z_C^{-1} \text{sh} \frac{\omega L}{2} \frac{\partial}{\partial \omega}$; $Z_C^{-1} = \sqrt{L_{\phi}/C_{\phi}}$;

$I_1 = wL \sqrt{L_{\phi}C_{\phi}}$; U – фазное напряжение.

Корни полинома в числителе относительно независимой переменной L указывают на существование двух нулей функции, т.е. на отсутствие в линии электропередачи без потерь вынужденной со-

ставляющей тока в линейном выключателе при двух значениях мощности ШР. Физически это обусловлено наличием двух колебательных контуров, связанных междуфазной емкостью.

Для принятой схемы установки двух ШР на ВЛ резонансные индуктивности определяются как

$$L_{1,2} = - \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 16a}}{2a}.$$

Меньшее значение резонансной индуктивности ШР (L_1) соответствует мощности ШР, близкой к 96% зарядной мощности линии ($Q_{\text{ВЛ}}$), большее значение (L_2) – 75% (рис. 2).

Полученным значениям резонансных индуктивностей $L_{1,2}$, основной вклад в которые вносит индуктивность ШР, отвечает наибольшее время достижения током отключения нулевого значения.

I_{\sim}, A

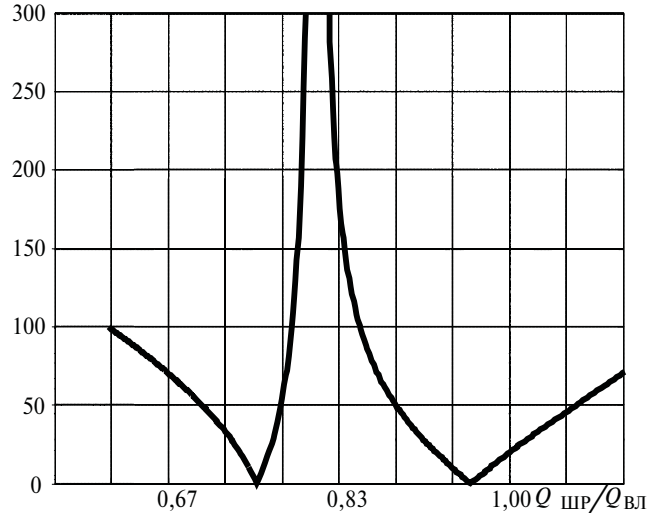


Рис. 2. Зависимость вынужденного тока в линейном выключателе от мощности ШР

Определение аperiodической компоненты. Начальное (максимальное по модулю) значение аperiodической составляющей

$$I_{\text{ап max}} = U_m \cos(j) / (X_R + X_S) + I_{R0}; \quad (2)$$

$$(u(t) = U_m \sin(\omega t)),$$

где X_R, X_S – эквивалентные реактивные сопротивления линейных шунтирующих реакторов и электрической системы; $I_{R0} = i_R(t_{\text{вкл}})$ – начальный (остаточный) ток в ШР при автоматическом повторном включении линии электропередачи.

Математическое ожидание фаз включения воздушных выключателей $M[j]$, как правило, находится в диапазоне от 60 до 70°, поэтому вероятность появления большой аperiodической составляющей в ШР и, соответственно, в линейном выключателе достаточно мала. Кроме того, воздушные выключа-

тели характеризуются значительными токами среза, что также облегчает прерывание тока с аperiodической составляющей по сравнению с элегазовыми выключателями, у которых ток среза не превышает единиц ампер.

Без учета свободной колебательной компоненты в токе отключения i_k (возникающей при обрыве тока в поврежденной фазе – см. далее) максимальное время достижения током нулевого значения (время задержки его прерывания t_3) определяется по выражению

$$t_3 \gg t \ln(I_{\text{ап max}} / \sqrt{2} I_{\sim}) \quad (\text{для } I_{\text{ап max}} > \sqrt{2} I_{\sim}), \quad (3)$$

где t – постоянная времени затухания аperiodической компоненты $i_{\text{ап}}$.

Незаниженная оценка постоянной времени, получаемая при пренебрежении нелинейным сопротивлением канала дуги ($R_d = 0$), равна $t \gg X_R / [R_R + R_S + R_{\Pi} + R_3 R_{Г.Т} / (R_3 + R_{Тр})] \omega$, где $R_R, R_S, R_{\Pi}, R_3, R_{Г.Т}$ – активные сопротивления реактора, электрической системы, провода, земли, заземленного грозозащитного троса.

Основные параметры, определяющие t : характеристики ШР (X_R, R_R) и сопротивление проводов линий электропередачи (если реактор включен на стороне линии, противоположной стороне включения). Как правило, $t \gg 200, 700$ мс.

Короткое замыкание в конце включаемой линии. При отключении тока КЗ одним из линейных выключателей возникает переходный процесс, который приводит к появлению свободной колебательной компоненты тока i_k в выключателях неповрежденных фаз. Наложение этой компоненты тока на остальные составляющие приводит к кратковременному приближению тока отключения к нулю и способствует его прерыванию.

При отключении однофазного КЗ в конце линии операторные токи $\mathbf{I}(p) = [I_1 \ I_2 \ I_3]^t$ в линейных выключателях (без учета потерь в линии @ $R_{\Phi} = 0$ и полагая включение на шины бесконечной мощности) определяются решением системы уравнений (рис. 3):

$$\begin{vmatrix} pL + 1/(pC) & pM & pM \\ pM & pL + 1/(pC) & pM \\ pM & pM & pL + 1/(pC) \end{vmatrix} \mathbf{I} = \frac{1}{p} \begin{vmatrix} U_{\text{нп1}} \\ U_{\text{нп}} \\ U_{\text{нп2}} \end{vmatrix}, \quad (4)$$

где $U_{\text{нп}}$ и $U_{\text{нп1,2}}$ – напряжение на поврежденной фазе со стороны отключения ВЛ и на неповрежденных фазах в момент прерывания тока КЗ (его прохождения через нулевое значение) соответственно; приближенно можно принять $U_{\text{нп}} = U_{\text{нп1}} \gg U_{\text{нп2}}$.

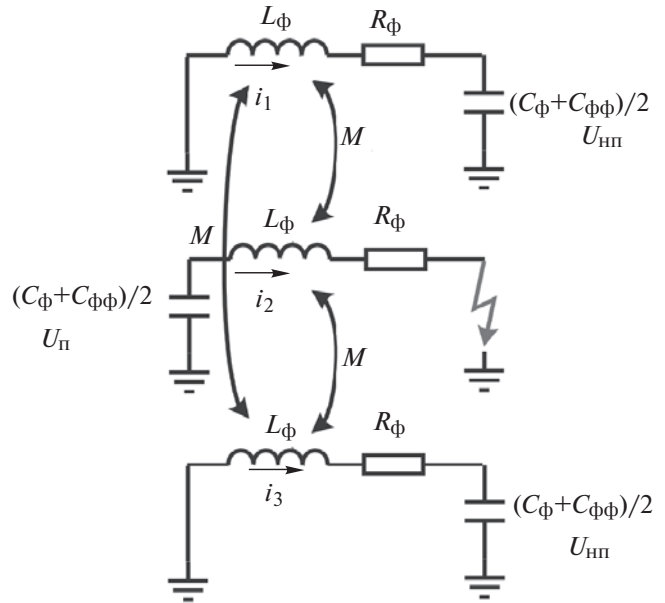


Рис. 3. Схема замещения при отключении КЗ в конце ВЛ

Решение для свободного колебательного тока в линейном выключателе неповрежденной фазы имеет вид:

$$I_k(p) = \frac{N(p)}{D(p)} = \frac{(dp^2 + U_{\text{нп}})C}{ap^4 + bp^2 + 1},$$

где $a = C^2(L^2 + LM - 2M^2)$; $b = C(2L + M)$; $d = -C(LU_{\text{нп}} + MU_{\text{п}})$.

Во временной области решение представляется как суперпозиция гармонических колебаний:

$$i_k(t) = -C \left[\frac{\sin(b_1 t)}{g_1} \frac{U_{\text{нп}}}{b_1} + b_1 \frac{d}{\partial} + \frac{\sin(b_2 t)}{g_2} \frac{U_{\text{нп}}}{b_2} + b_2 \frac{d}{\partial} \right], \quad (5)$$

где $g_1 = b - 2ab_1^2$; $g_2 = b - 2ab_2^2$.

Значения угловой частоты собственных колебаний $b_{1,2}$, получаемые решением характеристического биквадратного уравнения $D(p) = 0$:

$$b_1 = [C(L + 2M)]^{-0,5}; \quad b_2 = [C(L - 2M)]^{-0,5}.$$

В зависимости от параметров линий электропередачи начальные амплитуды свободного колебательного тока i_k , получаемые с помощью (5), достигают примерно 200, 350 А.

Короткое замыкание в начале линии. В случае КЗ вблизи стороны включения (опробования) в линии возникает переходный процесс, обусловленный восстановлением напряжения на шинах ПС после отключения КЗ. Амплитуда переходного напряжения, под действием которого возникают свободные колебания тока, оценивается по выражению (в отн. ед.):

$$DU = (Du^2 + Du + 1)^{0,5} - 1, \quad (6)$$

где $Du = (X_0 - X_1) / (X_0 + 2X_1)$; X_0, X_1 – сопротивления системы нулевой и прямой последовательности.

Амплитуда свободного колебательного тока в линейном выключателе, который формируется под действием этого напряжения, приближенно определяется как

$$i_{k \max} \approx DU / Z_C,$$

$$\text{где } Z_C = \sqrt{\frac{2(X_1 + X_{1ВЛ})}{\omega C_{1ВЛ} \left(1 + \frac{X_1}{X_1 + X_{1ВЛ}} \right)}}; \quad X_{1ВЛ}, C_{1ВЛ} -$$

сопротивление и емкость линии для прямой последовательности фаз.

В зависимости от параметров линии электропередачи и электрической системы начальная амплитуда свободного колебательного тока в рассматриваемом случае может достигать 100, 200 А.

При КЗ в произвольном месте на линии в токе линейного выключателя в разной мере присутствуют обе вышеотмеченные свободные составляющие. Из приведенного анализа следует, что начальная амплитуда i_k в выключателе может находиться в диапазоне от 100 до 350 А и она соизмерима с вынужденной и апериодической компонентами. На полученные оценки свободного колебательного тока также влияет остаточный переходный процесс, обусловленный включением линии.

Положительное влияние переходной компоненты тока отключения на процесс его прерывания в неповрежденных фазах зависит от номера полупериода колебания тока (промышленной частоты) однофазного КЗ, на котором происходит его отключение. При недокомпенсации шунтирующими реакторами емкостной проводимости линии и при $j = 0$ благоприятным для успешного прерывания тока является нечетный полупериод колебания тока в поврежденной фазе; при перекомпенсации, когда вынужденный ток меняет свою фазу на близкую к противоположной, – четный полупериод. Последнее поясняется на рис. 4: при приближении к нулю тока КЗ в области отрицательных значений (ток поврежденной фазы I_B – рис. 4,а) вынужденная составляющая тока в неповрежденной фазе I_A стремится к отрицательному максимуму, а ток отключения (рис. 4,б) – к минимуму, что способствует его прерыванию.

Математическое моделирование переходных процессов отключения однофазного КЗ с учетом дуги в элегазовом выключателе [4, 5] показало, что даже при кратковременном достижении током ну-

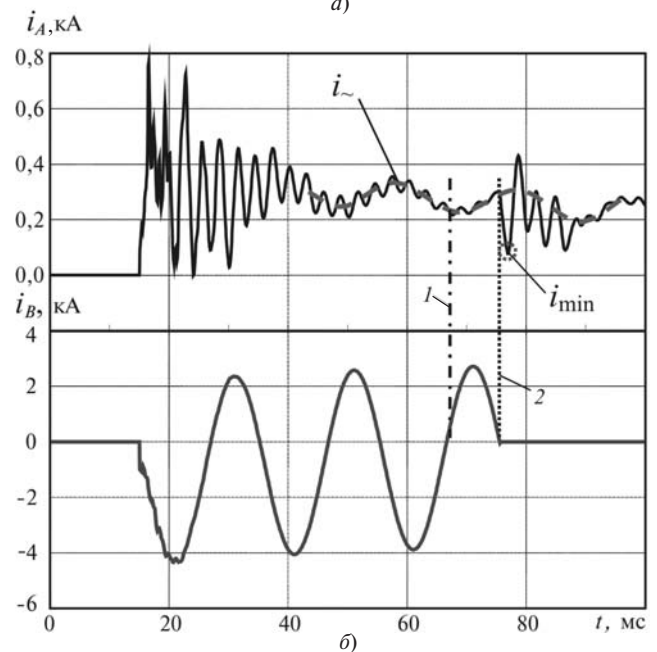
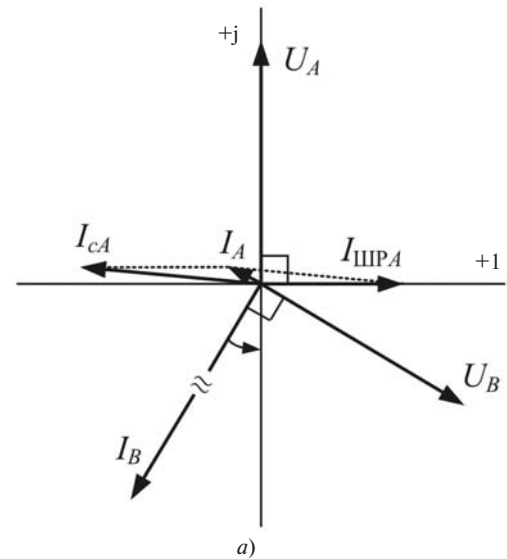


Рис. 4. Векторная диаграмма напряжений и токов в линейных выключателях (а), неотключение тока в неповрежденной фазе А на возрастающей части его вынужденной составляющей i_{\sim} (б); 1 и 2 – время оптимального и неоптимального прерывания тока КЗ; I_{CA} – зарядный ток, обусловленный фазной и междуфазной емкостью линии, $I_{ШПРА}$ – ток ШПР, I_A – ток в линейном выключателе ($j_A = 0$; коэффициент компенсации зарядной мощности линии $K_p = 0,866$)

левого значения (благодаря его свободной колебательной компоненте) в процессе отключения линии с типичными частотами основных свободных колебаний 200, 1000 Гц происходит уверенное прерывание тока (фаза С – см. рис. 5). Действительно, в начальной стадии отключения – после размыкания контактов выключателя благодаря значительной охлаждающей мощности P_0 , в дугогасительной камере происходит интенсивное охлаждение ствола дуги, ее гашение и прерывание малого (сотни ампер) тока в неповрежденных фазах линии. Когда свободная колебательная компонента тока незначительна (или быстро затухает), а апериодическая

велика и ток длительно не затухает, то спустя сотни миллисекунд после размыкания контактов выключателя интенсивность охлаждения дуги радикально снижается (газ в дугогасительной камере мало подвижен), горение дуги и прерывание тока затягиваются (негашение дуги на фазе А – рис. 1 и 5).

Следует отметить, что при снижении тока отключения примерно до 30 А и менее начинает сказываться нелинейность вольт-амперной характеристики дуги [6] (ее сопротивление становится соизмеримым с другими сопротивлениями в контуре протекания $i_{ап}$), что способствует некоторому ускорению ее гашения. При малых значениях вынужденного тока затухание аperiodической компоненты из-за нелинейности канала дуги не подчиняется экспоненциальному закону и происходит несколько быстрее.

После обрыва тока (вторым) линейным выключателем в одной из неповрежденных фаз (с возможной временной задержкой) в линии инициируется новый переходный процесс. Возникающие свободные низкочастотные колебания токов, накладывающиеся на вынужденную составляющую в линейном выключателе, в зависимости от фазы биения колебания могут как способствовать, так и препятствовать прерыванию тока отключения.

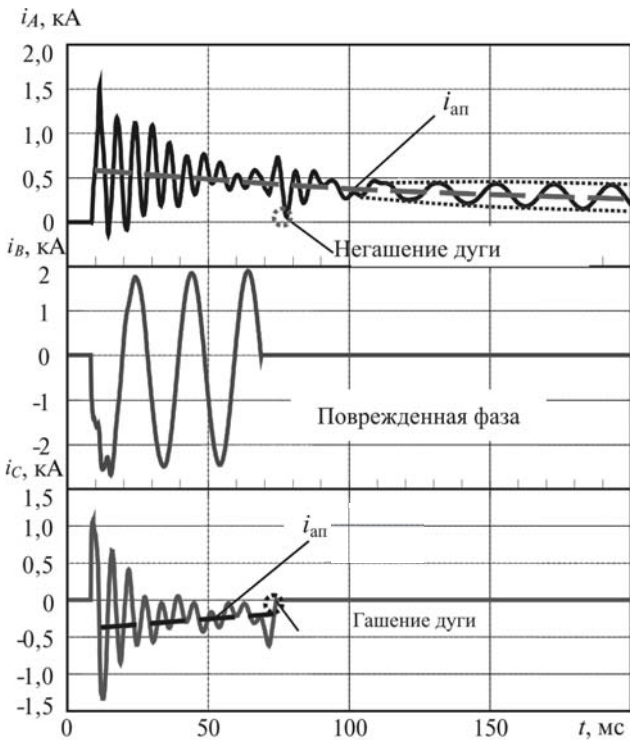


Рис. 5. Токи в линейных выключателях в цикле включение/отключение ВЛ 500 кВ ($j_A = 0$; КЗ в конце линии)

Оценка вероятности нештатного отключения. Под нештатным отключением линейного выключателя

понимается отключение с задержкой, превышающей типичное время полного отключения $t_{отк}$, которое для современных выключателей равно ~ 60 мс. Вероятность такого отключения в единичной коммутации планового включения (без учета в токе отключения свободной колебательной составляющей) равна:

$$P_{н.о.е} = 1 - \frac{2}{\rho} \arcsin \left| \frac{I_{\sim}}{K_d I_{ап \max}} \right| \approx I_{\sim} \varepsilon \left| K_d I_{ап \max} \right|$$

где $K_d = \exp(-t_{отк} / t)$ – коэффициент затухания аperiodической составляющей $i_{ап}$ в течение времени отключения КЗ $t_{отк}$.

Вероятность $P_{н.о.е}$ (как с учетом, так и без учета свободной колебательной компоненты в токе отключения) может быть рассчитана в соответствии с методом статистических испытаний, который программно реализован в большинстве ЕМТР-клонах [7–9]. Случайные параметры – угол включения $j \hat{I} [0; 360]^\circ$ и начальный ток ШР $I_{R0} \hat{I} [I_{R0 \max}; +I_{R0 \max}]$, распределены по законам равномерной плотности. Следует отметить, что предположение о распределении углов включения j по закону равномерной плотности несколько увеличивает вероятность нештатного отключения линейного выключателя. Учет свободной колебательной составляющей i_k в токе отключения приводит к заметному снижению вероятности $P_{н.о.е}$.

При ТАПВ вероятность $P_{н.о.е}$ возрастает из-за возможности увеличения аperiodической компоненты тока отключения дополнительно на значение начального тока реактора I_{R0} . Значение остаточного тока в свою очередь зависит от принятой длительности бестоковой паузы $t_{ТАПВ}$: при $t_{ТАПВ} > 5$ с можно уверенно считать, что $I_{R0} = 0$, поэтому вероятности «нештатного» отключения линейных выключателей становятся равными как при плановом включении линии электропередачи, так и при ТАПВ.

В течение нормативного срока эксплуатации выключателей ($N_H = 25, 30$ лет) вероятность нештатного отключения при ТАПВ можно оценить следующим образом:

$$P_{н.о} = P_{нуАПВ} P_{н.о.е} n_{г.о} L_{ВЛ} N_{г.} N_H, \quad (7)$$

где $P_{нуАПВ}$ – вероятность неуспешного ТАПВ; $n_{г.о}$ – удельное число грозовых отключений линии электропередачи (на 100 км и 100 грозовых часов); $N_{г.}$ – число грозовых часов в год.

Если $P_{н.о} > 0,05$, то следует проводить мероприятия, позволяющие предотвращать нештатные отключения выключателей.

«Алгоритмические» способы предотвращения возникновения апериодической компоненты. Очевидным способом исключения нештатного отключения является формирование специальной команды задержки отключения выключателей неповрежденных фаз линии. При неуспешном включении линии в первую очередь с минимальной задержкой должна отключаться поврежденная фаза. Неповрежденные фазы не требуют «мгновенного» отключения, поскольку в них отсутствует сверхток. Оценка требуемой задержки отключения неповрежденных фаз может быть получена по (2) в зависимости от параметров электропередачи. Недостатком такого подхода является необходимость перепрограммирования (доработки) существующих систем релейной защиты и противоаварийной автоматики (хотя, принципиально, все современные микропроцессорные системы защит вполне позволяют реализовать такой алгоритм отключения).

Другой способ заключается в предварительном отключении ШПР перед включением линии. В этом случае благодаря недокомпенсации емкости линии происходит увеличение вынужденной составляющей тока отключения и снижение апериодической, что радикально снижает относительное содержание апериодической компоненты.

«Аппаратные» способы. Синхронизированное (управляемое) включение линейных выключателей позволяет в значительной мере исключить появление апериодической составляющей в ШПР и линейных выключателях при плановых включениях. Полному исключению апериодической компоненты тока препятствует разброс времени включения выключателя, достигающий 1 мс. Однако синхронизирующие (дополнительные) приставки к линейному выключателю в случае такого применения меняют свое назначение, поскольку для снижения перенапряжений (и переходных токов) углы (фазы) включения традиционно принимаются близкими к нулю ($j \approx 0$). Приближение фаз включения к $\pm 90^\circ$ приводит к возрастанию перенапряжений, что неизбежно снижает надежность успешного включения электропередачи и увеличению энергетических нагрузок на защитные аппараты. Синхронизированное включение не позволяет полностью исключить появление апериодической компоненты в выключателе при ТАПВ, поскольку в ШПР в момент включения может оставаться остаточный ток I_{R0} .

Во многих реальных электропередачах в силу ненулевого значения вынужденной составляющей в токе отключения выключателя (при малых соотношениях $I_{ап}/I_{\sim}$) фаза включения может отличаться от $\pm 90^\circ$, что позволяет выполнять более «мягкое» включение электропередачи.

Компромиссное решение – применение выключателей с предвключенными резисторами, основное назначение которых до настоящего времени – снижение коммутационных перенапряжений.

Время предвключенного состояния линии через резистор выключателя с $R \gg 400$ Ом составляет, как правило, $Dt = 9, 11$ мс. На первом этапе включения линии через резистор (замкнуты вспомогательные контакты (ВК) выключателя) в реактор поступает некоторый ток I_{RI} , на втором этапе (через примерно 10 мс) при замыкании главных контактов (ГК) – ток I_{RII} , который противоположен по знаку первому, что радикально снижает апериодическую составляющую тока в реакторе.

Представляя электропередачу простейшей схемой замещения (рис. 6), на первом этапе включения (замыкаются ВК) ток в реакторе (в частотной области) определяется по выражению:

$$I_{RI} = \frac{U(p \sin(j) + w \cos(j))}{(p^2 + w^2) \frac{L}{C} + \frac{L}{C(pL + 1/(pC))} pC(pL + 1/(pC))} \dot{U}$$

или

$$I_{RI} = \frac{U(p \sin(j) + w \cos(j))}{(p^2 + w^2) \frac{L}{C} + 2 \frac{p}{b^2} + \frac{1}{d}} \dot{U} \quad (8)$$

где $b = (LC)^{-1}$; $d = (2RC)^{-1}$; j – фаза включения ВК.

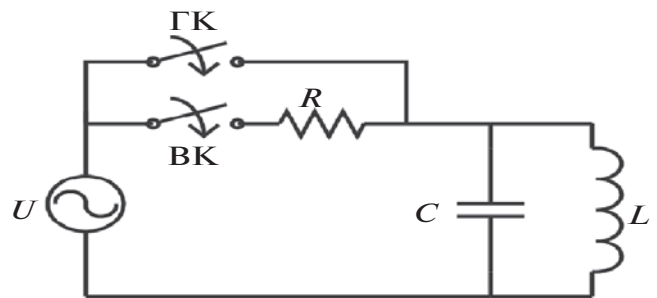


Рис. 6. Простейшая схема замещения поперечно-компенсированной линии электропередачи, включаемой выключателем с предвключаемым резистором

Представим наиболее неблагоприятный случай, когда компенсирована вся зарядная мощность линии электропередачи, поэтому $w = b$ (вынужденная компонента $I_{\sim} = 0$). При обратном преобразовании Лапласа выражения (8) получим решение для тока i_{RI} во временной области:

$$i_{RI}(t) = UwC [\cos(\omega t + j) + \frac{1}{2k} \exp(-dt) \sqrt{P^2 + Q^2} \sin(\omega t + a)],$$

где $k = \sqrt{d^2 - w^2}$; $a = \arctan(Q / P)$;

$$Q = A_1 \cos(a_1) + A_2 \cos(a_2);$$

$$P = A_2 \sin(a_2) - A_1 \sin(a_1); \quad A_1 = \sqrt{(w - k)^2 + d^2};$$

$$A_2 = \sqrt{(w + k)^2 + d^2}; \quad a_1 = j + \arctan((w - k) / d);$$

$$a_2 = j + \arctan((w + k) / d).$$

I , отн. ед.

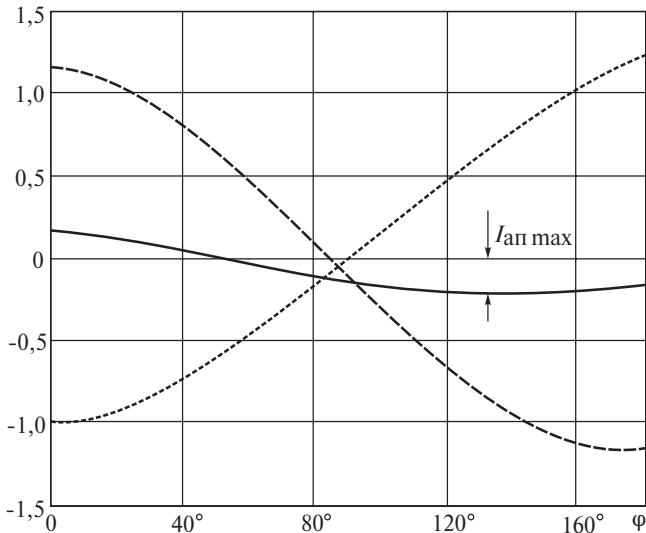


Рис. 7. Зависимости токов через реактор на различных этапах включения линии: - - - - I_{RI} ; ····· - I_{RII} ; — - $I_{ап}$

Зависимость значения тока I_{RI} от фазы включения показана на рис. 7 ($Dt = 10$ мс, $w = 100p$). Начальное (максимальное) значение аperiodической составляющей определится как сумма токов, вводимых в реактор на обоих этапах включения линии, т.е. $I_{ап max} = I_{RI} + I_{RII}$, где I_{RII} определяется по (2). Максимальный аperiodический ток составляет примерно 20% номинального (амплитудного) значения тока реактора (рис. 7). Таким образом, включение линии выключателем с предвключаемым резистором значительно снижает аperiodическую компоненту, но не позволяет полностью предотвратить ее появление. Для снижения тока на первом этапе включения и, соответственно, минимизации аperiodической компоненты требуется оптимизация сопротивления предвключаемого резистора, который может быть не оптимальным с точки зрения снижения коммутационных перенапряжений в линии.

Отрицательным моментом использования выключателей с предвключаемыми резисторами является выделение значительной энергии при включении линии с неустранившимся (возникающим при включении) коротким замыканием.

Энергия, выделяемая в резисторе за время включенного состояния t_R ,

$$E_R(t_R) = \frac{1}{R} \int_0^{t_R} [U \sin(\omega t + j)]^2 dt$$

или

$$E_R(t_R) = \frac{U^2}{2\omega R} [\omega t_R + \cos j \sin j - \cos(\omega t_R + j)]$$

$$\sin(\omega t_R + j) = \frac{U^2}{2\omega R} [\omega t_R + \cos(\omega t_R + 2j) \sin(\omega t_R)].$$

Поскольку выделяемая энергия зависит от угла включения j , то для определения ее максимального значения необходимо взять производную от последнего выражения по углу включения и приравнять ее к нулю. По найденному значению угла j_{max} определяется максимальная энергия, поглощаемая резистором.

Однако, если принять время протекания тока в резисторе строго равным полупериоду промышленной частоты, например $t_R = 10$ мс ($w = 100p$), то энергия становится инвариантной по отношению к фазе включения и выражение существенно упрощается:

$$E_R(t_R = 10 \text{ мс}) = \frac{U^2}{2R} 0,01.$$

При включении линии электропередачи от источника бесконечной мощности через предвключаемый резистор с сопротивлением $R = 400$ Ом в нем выделится энергия $E_R = 2,3$ МДж ($U = 525\sqrt{2} / \sqrt{3} = 429$ кВ).

Если в алгоритмах работы релейной защиты и противоаварийной автоматики предусматривается применение ТАПВ после неуспешного ОАПВ, то число коммутаций, при которых возможно включение на неустранившееся КЗ, возрастает до двух. Процесс накопления энергии в предвключаемом резисторе при двух коммутациях, следующих с минимальной временной задержкой, можно считать адиабатическим, поэтому энергоемкость предвключаемого резистора должна быть рассчитана на удвоенную поглощаемую энергию, т.е. при таком алгоритме работы противоаварийной автоматики энергоемкость $E_R = 4,6$ МДж.

Выводы. 1. В поперечно-компенсированных линиях электропередачи в цикле включение/быстрое отключение возможно появление значительной аperiodической составляющей в токе отключения линейных выключателей неповрежденных фаз, препятствующей прерыванию тока. Задержка отключения линии негативно влияет на работу элегазового выключателя и может провоцировать развитие технологических нарушений, сопровождающихся значительными ущербами.

2. Эффективным способом быстрого отключения компенсированной линии электропередачи, исключая отрицательное воздействие апериодической компоненты тока в линейных выключателях неповрежденных фаз, является разновременное пофазное отключение (поврежденной и неповрежденных фаз).

3. В зависимости от степени компенсации реакторами зарядной мощности линии могут успешно применяться (в разной мере): предварительное отключение шунтирующих реакторов; синхронизированное включение; выключатели с предвключаемыми резисторами.

4. Обоснование необходимости применения специальных способов повышения надежности отключения поперечно-компенсированных линий электропередачи в обязательном порядке должно включать вероятностный анализ возникновения нештатных отключений.

4. Schavemaker P.H. and Van der Sluis L. An Improved Mayr-Type Arc Model Based on Current-Zero Measurements. — IEEE Transactions on Power Delivery, April 2000, vol. 15, No 2.

5. Van der Sluis L., Rutgers W.R. and Koreman C.G.A. A Physical Arc Model for the Simulation of Current Zero Behaviour of High-Voltage Circuit Breakers. — IEEE Trans. on Power Delivery, 1992, vol. 7, No 2.

6. **Высоковольтные** электрические аппараты с элегазовой изоляцией / Под ред. Ю.И. Вишневецкого. — СПб: Энергоатомиздат, 2002.

7. Gole A.M., Nayak O.B., Sidhu T.S. and Sachdev M.S. A Graphical Electromagnetic Simulation Laboratory for Power System Engineering Programs. — IEEE Trans. on Power Systems, May 1996, vol. 11, № 2.

8. Mahseredjian J., Denetière S., Dubé L. et al. On a new approach for the simulation of transients in power systems. — Proc. of the Intern. Conf. on Power Systems Transients (IPST-2005), Montreal, 19–23 June, 2005.

9. **Alternative** Transients Program Rule Book. — Leuven, 1987.

[01.04.12]

Авторы: Качесов Владимир Егорович в 1981 г. окончил Новосибирский электротехнический институт (ныне Новосибирский государственный технический университет — НГТУ) по специальности «Техника высоких напряжений». В 2008 г. в Томском политехническом университете защитил докторскую диссертацию «Однофазные повреждения в электрических сетях среднего и высокого классов напряжений. Теория, методы исследований и меры предотвращения повреждений». Главный специалист НПП «ЭНЕРГОКОНСАЛТ» (Новосибирск).

Качесов Дмитрий Владимирович в 2006 г. окончил НГТУ по специальности «Высоковольтная электроэнергетика и электротехника». Старший инженер НПП «ЭНЕРГОКОНСАЛТ».

* * *

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. Качесов В.Е., Качесов Д.В., Тетерин С.Ю. О требованиях к алгоритмам коммутаций поперечно-компенсированных ВЛ СВН. — XVI Научно-техн. конф. «Обмен опытом проектирования, наладки и эксплуатации устройств РЗА и ПА в энергосистемах Урала», Екатеринбург, 19–22 апреля 2010.

3. Качесов В.Е., Качесов Д.В. Резонансные перенапряжения в неполнофазных режимах в поперечно-компенсированных ЛЭП СВН. — Электротехника, 2012, № 3.

Внимание предприятий, организаций, НИИ, вузов России и зарубежных фирм!

Журнал «Электричество» предоставляет свои страницы для

- РЕКЛАМЫ ИЗДЕЛИЙ отечественных предприятий и зарубежных фирм в области энергетики, электротехники, электроники, автоматики
- ПУБЛИКАЦИИ ОБЪЯВЛЕНИЙ о научных симпозиумах, конференциях, совещаниях, семинарах
- ДРУГОЙ ИНФОРМАЦИИ, соответствующей тематике журнала

Сообщаем, что журнал поступает к зарубежным подписчикам во многих странах мира.

Напоминаем наш адрес: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648.

Тел./факс (7-495)362-7485