

АНАЛИЗ ЛИКВИДАЦИИ НЕУСТОЙЧИВЫХ ДВУХФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ТРАНСПОНИРОВАННЫХ ЛИНИЯХ СВН В ЦИКЛЕ ДВУХФАЗНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ

В данной статье дискутируются главные аспекты двухфазного автоматического повторного включения (ДАПВ) в транспонированных линиях СВН, оснащенных 4-лучевыми шунтирующими реакторами (ШР). В линиях напряжением 500-1150 кВ подавляющая доля отключений вызывается однофазными короткими замыканиями (ОКЗ), значительная часть которых, будучи неустойчивыми дуговыми авариями, успешно ликвидируется в цикле однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ). Однако заметную долю (порядка 5-10%) составляют двухфазные короткие замыкания (ДКЗ), для ликвидации которых обычно используется трехфазное быстродействующее АПВ (БАПВ). Представляет интерес проанализировать эффективность использования двухфазного АПВ для устранения двухфазных КЗ. Показано, что надлежащее представление реальной транспозиции линии необходимо для определения восстанавливающихся напряжений (ВН) и вторичных токов дуги (ВТД) в паузу ДАПВ. В линиях длиной порядка 500 км, оснащенных тремя ШР, предлагается способ снижения ВТД и ВН с использованием батарей конденсаторов, включаемых последовательно с ШР в паузу ДАПВ.

Ключевые слова: линии СВН, транспонированная линия, 4-лучевые ШР, ДАПВ, восстанавливаемое напряжение, вторичный ток дуги, бестоковая пауза.

ВВЕДЕНИЕ

Большое количество публикаций посвящено ликвидации наиболее вероятных однофазных коротких замыканий в цикле ОАПВ вместо трёхфазного АПВ (ТАПВ), что сопровождается минимальными возмущениями на примыкающие системы [1-5].

Заметным видом аварий в ВЛ СВН также являются двухфазные короткие замыкания, доля которых может достигать (5-10)% [6, 7]. При этом значительная часть ДКЗ представляет неустойчивые дуговые замыкания, которые могут быть успешно ликвидированы в цикле ТАПВ или ДАПВ.

Установление требуемой длительности бестоковой паузы для успешного осуществления ДАПВ является основной задачей, возникающей при применении ДАПВ. Требования к длительности бестоковой паузы ДАПВ обусловлены тем, что после отключения аварийных фаз с двух сторон дуга в месте ДКЗ продолжает гореть, получая подпитку от неотключенной фазы линии. Основной проблемой обеспечения надежного ДАПВ является сокращение времени горения дуги подпитки путем уменьшения тока подпитки и восстановления напряжения.

Преимущество ДАПВ по сравнению с ТАПВ состоит в том, что нет полного разрыва ВЛ, так как сохраняется передача мощности по неповрежденной фазе линии, что повышает динамическую устойчивость примыкающих систем.

Характер ДАПВ определяется характеристиками вторичной дуги в длинных промежутках, а также эффективностью методов для снижения вторичного тока дуги (ВТД) и после гашения вторичной дуги восста-

навливающегося напряжения (ВН).

Главными параметрами, от которых зависит гашение вторичной дуги, являются: ВТД, протекающие в дуге до её гашения, $I_{ВТД}$; ВН, возникающее в месте вторичной дуги после её гашения, $U_{ВН}$.

По данным [8] среднее время гашения дуги и, соответственно, успешной паузы ОАПВ зависит от установившегося тока ВТД. Эта зависимость, представленная в графическом виде, с достаточной точностью может быть аппроксимирована в аналитической форме и использована при оценке успешности ДАПВ:

$$t_{\text{ДАПВ}}(I_d) = 0,5 - 1,67 \cdot 10^{-3} I_d + 2,78 \cdot 10^{-4} I_d^2, \quad (1)$$

где I_d – ток дуги.

Как правило, длинные линии имеют транспозицию. При расчете ВТД и ВН такие линии зачастую представляются как идеально транспонированные, имеющие равные собственные и взаимные продольные и поперечные элементы для всех фаз. Однако, как показано в [9], транспозиция линий должна учитываться.

В следующем разделе описывается методика, использующая теорию 8-полюсников, для надлежащего учета транспозиции линий.

Анализ в данной статье выполняется для ВЛ 500 кВ традиционной конструкции с горизонтальным расположением фаз с однократным циклом транспозиции, как показано на **рис. 1**.

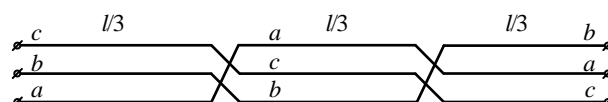


Рис. 1. Однократный цикл транспозиции

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ВТД И ВН В ЛИНИЯХ
С РЕАЛЬНОЙ ТРАНСПОЗИЦИЕЙ

Наиболее универсальным методом расчета является матричный метод, в котором линия и другие элементы электропередачи представляются в фазных координатах. Для получения общей картины достаточно оценить ВТД в узловых точках 1п, 2л, где имеют место наибольшие ВТД. На рис. 2 представлена схема для расчета ВТД в узле 1п в виде каскадного соединения отдельных участков, каждый из которых замещается соответствующим 8-полюсником.

Полная фазная матрица дальней ЭП формируется согласно рис. 2:

$$M_{12} = M_B M_d M_{ШР1} M_{ВЛ} M_{ШР2} M_B. \quad (2)$$

Соответствующие компоненты (2) определяются следующим образом.

На рис. 3 показана схема моделирования коммутационного состояния выключателя. При $R_v = 0$ фаза v включена. При $R_v \rightarrow \infty$ моделируется разомкнутое состояние. При этом достаточно принять $R_v = 10^6$ Ом.

Полная матрица состояния выключателя запишется следующим образом:

$$M_B = \begin{vmatrix} \mathbf{1}_3 & \mathbf{R}_B \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{1}_3 \end{vmatrix}; \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_B = \begin{vmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{vmatrix};$$

$$\mathbf{1}_3 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

где \mathbf{R}_B – матрица состояния выключателя; $\mathbf{1}_3$ – единичная матрица 3-го порядка. Например, при

$$\mathbf{R}_B = \begin{vmatrix} 10^6 & 0 & 0 \\ 0 & 10^6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

фазы «a» и «b» отключены, а фаза «c» включена.

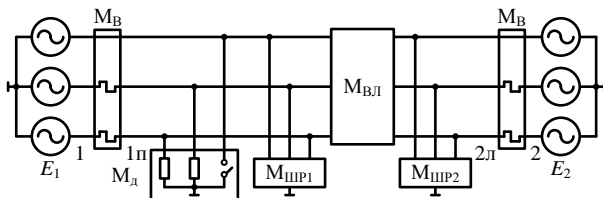


Рис. 2. Трехфазная схема для расчета ВТД и ВН

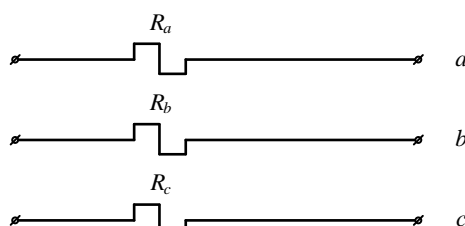


Рис. 3. Моделирование коммутационного состояния выключателя

В статье рассматриваются два случая:

- межфазовое КЗ, которое вполне вероятно при пляске проводов;
- межфазовое КЗ на землю. (Например, в грозовой период при ударе молнии в провод возможно сближение фаз в результате пляски проводов, что может привести к одновременному перекрытию как на опоре, так и на другую фазу. Хотя такое повреждение маловероятно, но не исключено).

Исходя из этого, матрица дуги описывается в зависимости от вида замыкания.

Полная фазная матрица дуги имеет вид

$$M_d = \begin{vmatrix} \mathbf{1}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{G}_d & \mathbf{1}_3 \end{vmatrix}; \quad (4)$$

где \mathbf{G}_d матрица дуги при её горении между фазами «a» и «b»

$$\mathbf{G}_d = \begin{vmatrix} \frac{1}{R_{ab}} & -\frac{1}{R_{ab}} & 0 \\ -\frac{1}{R_{ab}} & \frac{1}{R_{ab}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix},$$

или при её горении между фазами «a» и «b», а также между фазой «a» и землёй

$$\mathbf{G}_d = \begin{vmatrix} \frac{1}{R_{az}} + \frac{1}{R_{ab}} & -\frac{1}{R_{ab}} & 0 \\ -\frac{1}{R_{ab}} & \frac{1}{R_{ab}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix};$$

R_{ab} – сопротивление дуги между фазами «a» и «b»; R_{az} – сопротивление дуги между фазой «a» и землёй.

ВТД зависит от сопротивления вторичной дуги, которое является нелинейной функцией ВТД. Принимая во внимание модель дуги, представленную в [10], сопротивление дуги можно аппроксимировать следующим выражением:

$$R_d = \frac{A}{I_d^\alpha}, \quad (5)$$

где $\alpha = 1,4$, $A \approx 3,5 \cdot 10^5$ для ВЛ 500 кВ.

При оценке успешности ДАПВ возникает вопрос, каким сопротивлением следует учитывать дугу. После отключения аварийных фаз ток дуги затухает за 4-5 периодов, и сопротивление вторичной дуги находится в диапазоне 500-2000 Ом. Что касается входного сопротивления схемы относительно места повреждения, то оно при отключенных аварийных фазах с двух сторон на порядок превышает сопротивление дуги, т.е. сопротивление дуги не оказывает заметное влияние на ВТД и при дальнейших расчетах принимается равным 500 Ом.

Полная матрица шунтирующего реактора, включая нулевой реактор в его нейтрали, имеет вид:

$$\mathbf{M}_{\text{шр}} = \begin{bmatrix} \mathbf{1}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{Y}_{\text{шрф}} & \mathbf{1}_3 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $\mathbf{Y}_{\text{шрф}} = \mathbf{Z}_{\text{шрф}}^{-1}$,

$$\mathbf{Z}_{\text{шрф}} = \begin{bmatrix} Z_{\text{шр}} + jX_{\text{н}} & jX_{\text{н}} & jX_{\text{н}} \\ jX_{\text{н}} & Z_{\text{шр}} + jX_{\text{н}} & jX_{\text{н}} \\ jX_{\text{н}} & jX_{\text{н}} & Z_{\text{шр}} + jX_{\text{н}} \end{bmatrix},$$

$Z_{\text{шр}}$ – фазное сопротивление собственно шунтирующего реактора; $X_{\text{н}}$ – сопротивление нулевого реактора.

Транспонированная линия, моделируемая в фазных координатах, представлена на рис. 4 в виде каскадно соединенных 8-полюсников.

Фазная матрица транспонированной ВЛ определяется как

$$\mathbf{M}_{\text{ВЛ}} = \mathbf{M}_{\text{Т}} \mathbf{M}_{\text{ш}} \mathbf{M}_{\text{Т}} \mathbf{M}_{\text{ш}} \mathbf{M}_{\text{Т}} \mathbf{M}_{\text{ш}}. \quad (7)$$

Полная матрица транспозиции

$$\mathbf{M}_{\text{Т}} = \begin{bmatrix} \mathbf{T} & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{T} \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{0}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

где \mathbf{T} – матрица транспозиции; $\mathbf{0}_3$ – нулевая матрица 3-го порядка.

Полная матрица линии на шаге транспозиции имеет вид

$$\mathbf{M}_{\text{ш}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{\text{ш}} & \mathbf{B}_{\text{ш}} \\ \mathbf{C}_{\text{ш}} & \mathbf{D}_{\text{ш}} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где $\mathbf{A}_{\text{ш}}$, $\mathbf{B}_{\text{ш}}$, $\mathbf{C}_{\text{ш}}$, $\mathbf{D}_{\text{ш}}$ – матричные фазные коэффициенты на шаге транспозиции

$$\mathbf{A}_{\text{ш}} = \begin{bmatrix} A_{\text{ша}} & A_{\text{шab}} & A_{\text{шac}} \\ A_{\text{шba}} & A_{\text{шb}} & A_{\text{шbc}} \\ A_{\text{шca}} & A_{\text{шcb}} & A_{\text{шc}} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_{\text{ш}} = \begin{bmatrix} B_{\text{ша}} & B_{\text{шab}} & B_{\text{шac}} \\ B_{\text{шba}} & B_{\text{шb}} & B_{\text{шbc}} \\ B_{\text{шca}} & B_{\text{шcb}} & B_{\text{шc}} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C}_{\text{ш}} = \begin{bmatrix} C_{\text{ша}} & C_{\text{шab}} & C_{\text{шac}} \\ C_{\text{шba}} & C_{\text{шb}} & C_{\text{шbc}} \\ C_{\text{шca}} & C_{\text{шcb}} & C_{\text{шc}} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{D}_{\text{ш}} = \begin{bmatrix} D_{\text{ша}} & D_{\text{шab}} & D_{\text{шac}} \\ D_{\text{шba}} & D_{\text{шb}} & D_{\text{шbc}} \\ D_{\text{шca}} & D_{\text{шcb}} & D_{\text{шc}} \end{bmatrix}.$$

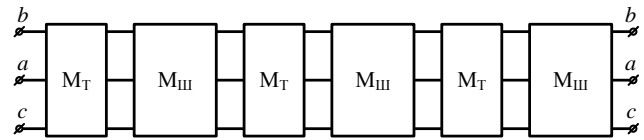


Рис. 4. Моделирование транспонированной линии

Алгоритм для определения ВТД строится следующим образом. Сначала определяется полная фазная матрица всей схемы 1-2 согласно (2) и матрицы участков 1п-2, 2л-2:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{1п2} &= \mathbf{M}_{\text{д}} \mathbf{M}_{\text{шр1}} \mathbf{M}_{\text{ВЛ}} \mathbf{M}_{\text{шр2}} \mathbf{M}_{\text{В}}; \\ \mathbf{M}_{2л2} &= \mathbf{M}_{\text{В}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Далее определяются соответствующие подматрицы этих полных матриц:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{12} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{12}, 0, 2, 0, 2), \\ \mathbf{B}_{12} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{12}, 0, 2, 3, 5); \\ \mathbf{A}_{1п2} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{12}, 0, 2, 0, 2), \\ \mathbf{B}_{1п2} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{12}, 0, 2, 3, 5); \\ \mathbf{A}_{2л2} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{2л2}, 0, 2, 0, 2), \\ \mathbf{B}_{2л2} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{2л2}, 0, 2, 3, 5). \end{aligned} \quad (11)$$

Определяем вектор-столбец фазных токов в конце схемы:

$$\mathbf{I}_{2ф} = \mathbf{B}_{12}^{-1}(\mathbf{U}_{1ф} - \mathbf{A}_{12} \mathbf{U}_{2ф}), \quad (12)$$

$$\mathbf{U}_{1ф} = \frac{525}{\sqrt{3}} e^{i\delta} \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U}_{2ф} = \frac{500}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{U}_{1ф}$, $\mathbf{U}_{2ф}$ – вектор-столбцы заданных напряжений в узлах 1 и 2; $a = e^{i2\pi/3}$.

Находим вектор-столбцы фазных напряжений в узлах 1п и 2л в месте горения дуги:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{1пф} &= \mathbf{A}_{1п2} \mathbf{U}_{2ф} + \mathbf{B}_{1п2} \mathbf{I}_{2ф}; \\ \mathbf{U}_{2лф} &= \mathbf{A}_{2л2} \mathbf{U}_{2ф} + \mathbf{B}_{2л2} \mathbf{I}_{2ф}. \end{aligned} \quad (13)$$

Далее определяем напряжения аварийных фаз в местах возможного горения вторичной дуги $U_{1пад}$, $U_{1пбд}$, $U_{2лад}$, $U_{2лбд}$ и соответственно амплитуды вторичного тока дуги:

$$\begin{aligned} I_{1пад} &= \sqrt{2} \frac{U_{1пад}}{R_{\text{д}}}; \\ I_{2лад} &= \sqrt{2} \frac{U_{2лад}}{R_{\text{д}}}; \\ I_{1пбд} &= \sqrt{2} \frac{U_{1пад} - U_{1пбд}}{R_{\text{д}}}; \\ I_{2лбд} &= \sqrt{2} \frac{U_{2лад} - U_{2лбд}}{R_{\text{д}}}. \end{aligned} \quad (14)$$

Полагая, что в (4) $R_d \rightarrow \infty$ (практически достаточно принять $R_d = 10^6 \text{ Ом}$), найдем из (13) ВН на аварийной фазе после гашения вторичной дуги.

АНАЛИЗ ВТД И ВН ПРИ РЕАЛЬНОЙ
ТРАНСПОЗИЦИИ ВЛ

Основываясь на предложенном алгоритме, проанализируем условия гашения вторичной дуги для ВЛ 500 кВ при её длинах 300 и 500 км. Реактивная мощность ШР составляет 180 Мвар.

Необходимое условие, при котором гарантируется успешное ОАПВ в диапазоне паузы 0,5–1,0 с:

$$I_{\text{вТД}} \leq 10 - 45 A_{\text{ампл}} \cdot \quad (15)$$

Второе обстоятельство, которое должно приниматься в расчет, – это создание приемлемых условий работы для защитных аппаратов ОПН в паузу ОАПВ (рис. 5).

После гашения дуги возникают биения на отключенных фазах, обусловленные взаимодействием емкостных и индуктивных элементов электропередачи. Как показано в [5], для ВЛ 500 кВ допустимая величина вынужденной составляющей ВН оценивается величиной $U_{\text{вн, доп}} = 230 \text{ кВ}$, и, соответственно, должно выполняться условие

$$U_{\text{вн}} \leq U_{\text{вн, доп}} \cdot \quad (16)$$

Основным средством для снижения ВТД является включение нулевых реакторов в нейтрали ШР.

А. ВЛ 500 кВ, 300 км

Линии такой длины имеют по одному ШР на её концах. На рис. 6 представлены зависимости межфазных ВТД от сопротивления нулевого реактора, при оптимальной величине которого 170 Ом ток дуги приближается к нулю. Что касается ВТД с фазы «а» на землю, то даже при предельных углах он составляет около 10 А, и, соответственно, бестоковая пауза удовлетворяет условию (15).

На рис. 7 показана зависимость ВН на приемном конце аварийных фаз в зависимости от сопротивления нулевого реактора.

Как видно из этого рисунка, необходимые условия (16) относительно ВН выполняются, если при ДАПВ сопротивление нулевого реактора равно 170 Ом. Подобная картина относительно ВТД и ВН имеет место в случае аварии на отправном конце линии.



Рис. 5. ОАПВ в транспонированной линии, оборудованной ОПН

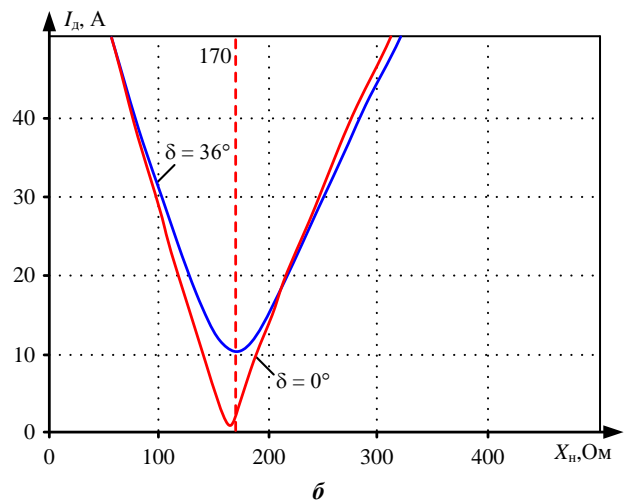
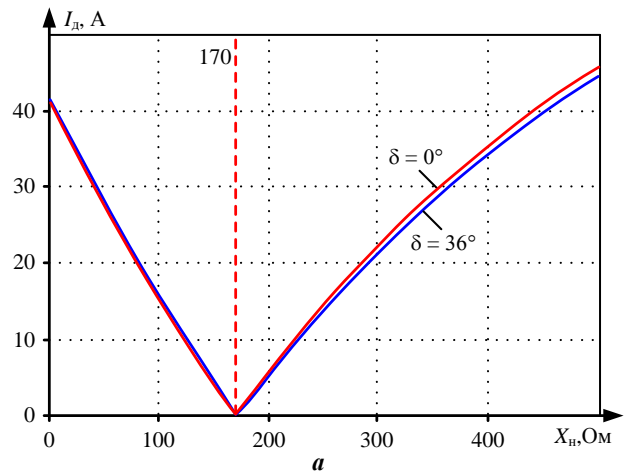


Рис. 6. Зависимость ВТД при аварии в конце линии от сопротивления нулевого реактора: а – межфазные ВТД; б – ВТД с фазы «а» на землю

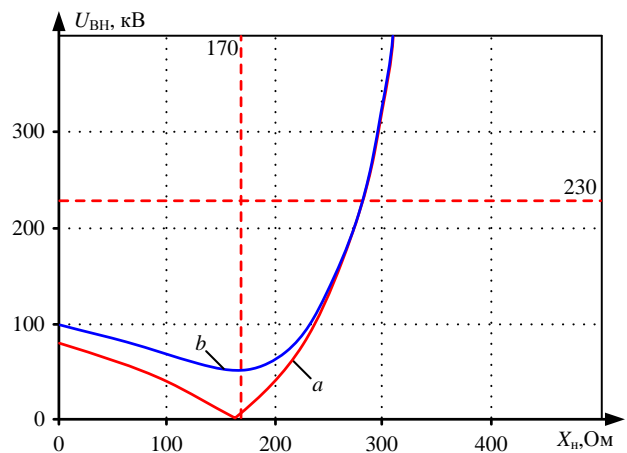


Рис. 7. Зависимость ВН при аварии в конце линии от сопротивления нулевого реактора

Б. ВЛ 500 кВ, 500 км

Линии такой длины обычно оснащаются тремя ШР. В нашем примере два ШР расположены на отправном конце линии и один ШР – на приемном конце.

На рис. 8 показана зависимость ВТД на приемном конце линии от сопротивления нулевого реактора, из которого видно, что ВТД удовлетворяет условию (15).

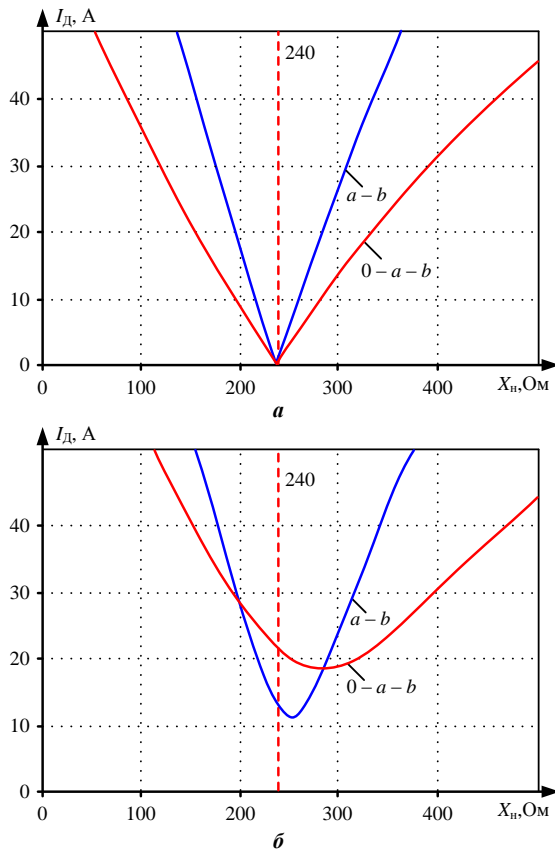


Рис. 8. Зависимость ВТД при аварии на приемном конце от сопротивления нейтрального реактора: $a - \delta=0^\circ$; $b - \delta=60^\circ$

Однако, как показывает рис. 9, ВН значительно превышают допустимый уровень, поскольку схема отличается резонансным характером.

Избавиться от резонанса возможно подключением во время ДАПВ только по одному ШР на концах линии или по два ШР на каждом конце линии. Однако в этом случае ВТД при углах 1 достигают 60 А и не будут удовлетворять условию (15).

Эффективный способ снижения ВТД, идея которого была высказана в [9], состоит в установке в аварийных фазах шунтирующих емкостей, которые зашунтированы во время нормальных режимов работы (рис. 10). Порядок работы устройства следующий: при возникновении ДКЗ линейные выключатели отключают аварийные фазы, потом включаются нейтральные реакторы и вводятся в работу соответствующие емкости.

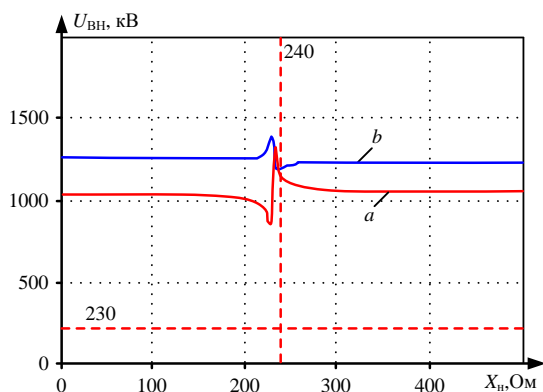


Рис. 9. Зависимость ВН при аварии на приемном конце от сопротивления нейтрального реактора

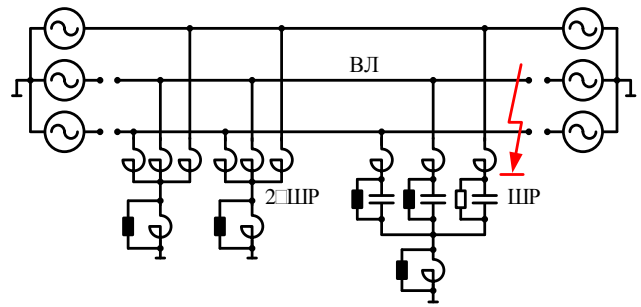


Рис. 10. Способ для обеспечения успешного ДАПВ

Для исключения резонанса и необходимого снижения ВТД сопротивление батареи конденсаторов должно находиться в диапазоне 15–20% от сопротивления ШР. Мощность батареи конденсаторов сравнительно мала и не превышает 10% от мощности ШР. На рис. 11 иллюстрируется эффективность предложенного способа.

При сопротивлении батареи конденсаторов, составляющем 15% от сопротивления ШР, и сопротивлениях нулевого реактора 240 Ом на отправном конце и 120 Ом на приемном конце ВТД не превышает 22 А, а ВН не попадает в резонансную зону.

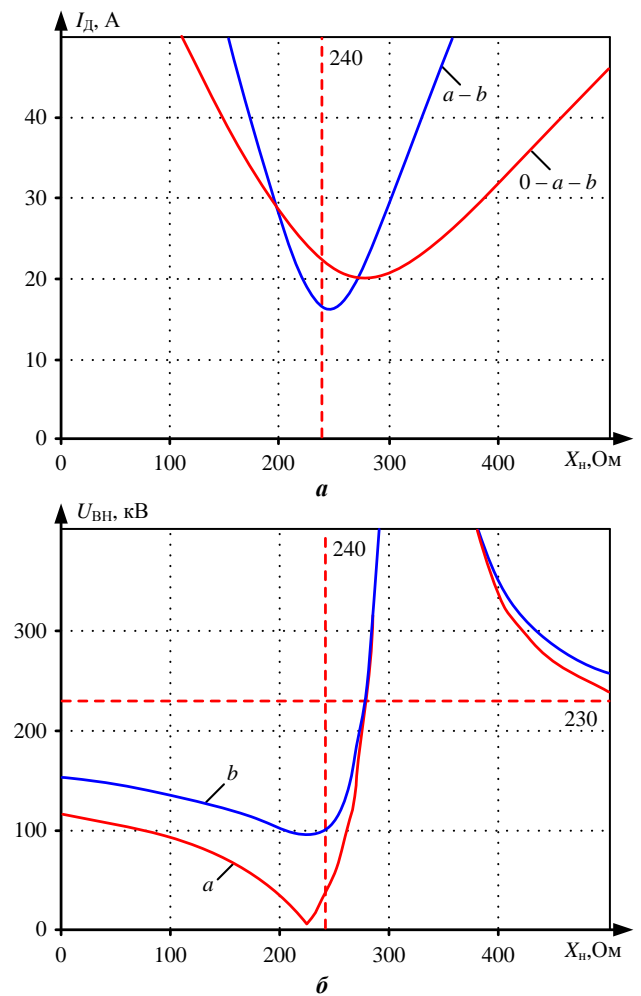


Рис. 11. Зависимость ВТД и ВН при аварии на приемном конце от сопротивления нейтрального реактора: $a - \text{ВТД}$; $b - \text{ВН}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье предлагается метод для анализа ДАПВ в транспонированных линиях СВН, оборудованных 4-лучевыми шунтирующими реакторами. Предлагаемый алгоритм позволяет рассчитывать восстанавливающиеся напряжения (ВН) и вторичные токи дуги (ВТД) по концам аварийных фаз, принимая в расчет реальную транспозицию линии с горизонтальным расположением фаз.

С использованием этого метода анализируются линии 500 кВ длиной 300 и 500 км. В линиях длиной порядка 300 км, оснащенных двумя реакторами, ВДТ и ВН находятся в допустимых пределах с возможностью иметь длительность паузы ДАПВ не более 0,6 с. Для линий длиной порядка 500 км, оснащенных тремя реакторами, успешное ДАПВ невозможно из-за возникновения резонансных ВН в схеме. В статье предлагается использование батарей конденсаторов, подключаемых последовательно в фазах ШР для осуществления успешного ДАПВ при длительности необходимой паузы порядка 0,6 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kimbark W. Suppression of Ground-Fault Arcs on Single-Pole Switched EHV Lines by Shunt Reactors // IEEE Transaction on Power Apparatus and System. March-April 1964. Vol. 83. Pp. 285-290.
2. Красильникова Т.Г., Джононаев С.Г. Способы ликвидации однофазных коротких замыканий в воздушных линиях сверхвысокого напряжения // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2016. № 2(84). С. 116-130.
3. Процессы при однофазном автоматическом повторном включении линий высоких напряжений / под ред. М.Л. Левинштейна. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.
4. Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения / под ред. Г.Н. Александрова. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние 1993. 560 с.
5. Красильникова Т.Г., Манусов В.З. Анализ токов дуги подпитки в паузу ОАПВ в процессе динамического перехода // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2009. №1. С. 313-316.
6. Зеличенко А.С., Смирнов Б.И. Проектирование механической части воздушных линий сверхвысокого напряжения. М.: Энергоиздат, 1981. 336 с.
7. Барг И.Г., Эдельман В.И. Воздушные линии электропередачи: вопросы эксплуатации и надежности. М.: Энергоатомиздат, 1985. 248 с.
8. Рашкес В.С. Обобщение эксплуатационных данных эффективности ОАПВ ВЛ СВН и опытных данных времени гашения дуги подпитки // Электрические станции. 1989. №3. С. 65-72.
9. Krasilnikova T., Samorodov G. Analysis method for transient single-phase fault removal on EHV transposed transmission lines // 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) Proceedings, Novosibirsk, 2018, vol. 1, part 5, pp. 173-178.
10. Goldberg S., Norton W.F., Tziouvaras D. A Computer Model of the Secondary Arc in Single Phase Operation of Transmission Lines, IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 4, no. 1, January 1989.

Поступила в редакцию 13 октября 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ANALYSIS OF ELIMINATION OF UNSTABLE TWO-PHASE SHORT CIRCUITS IN TRANPOSED EXTRA-HIGH VOLTAGE LINES IN A TWO-PHASE AUTOMATIC RECLOSING

Tatyana G. Krasilnikova

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Automated Electric Power Systems, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. E-mail: tatka552005@yandex.ru

Karomatullo A. Makhmudov

Assistant Professor, Department of Automated Electric Power Systems, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. E-mail: mahmudovkaromat@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2127-3772>.

Murodbek Kh. Safaraliev

Research Engineer, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia. E-mail: murodbek_03@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3433-9742>.

The paper is concerned with the main aspects of the two-phase automatic reclosing in transposed extra-high voltage lines equipped with four-radial shunt reactors. In 500-1150 kV lines, the overwhelming proportion of blackouts is caused by single-phase short circuits, many of which, being unstable arc accidents are conveniently eliminated in a single-phase automatic reclosing cycle. However, a considerable share (approximately 5–10%) is made up of double-phase short-circuits, for the elimination of these, a high-speed three-phase automatic reclosing is usually used. It is of great interest to analyze the efficiency of using double-phase automatic reclosing to eliminate double-phase short circuits. It was shown that complying presentation of the real transpose line is necessary to determine the transient recovery voltage and secondary arc current at two-phase automatic reclosing pause. In 500 km lines with equipped with three shunt

reactors, a method was proposed to decrease the secondary arc current and transient recovery voltage using capacitor batteries, which are connected in series with the shunt reactor during the two-phase automatic reclosing pause.

Keywords: extra-high voltage line, transposed line, four-radial shunt reactors, two-phase automatic reclosing, transient recovery voltage, secondary arc current, dead time.

REFERENCES

1. Kimbark W. Suppression of Ground-Fault Arcs on Single-Pole Switched EHV Lines by Shunt Reactors. IEEE Transaction on Power Apparatus and System, March-April 1964, vol. 83, pp. 285-290.
2. Krasilnikova T.G., Jononaev S.G. The methods of liquidation of a single-phase short circuit in the overhead lines of

- extra-high voltage. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Collection of scientific papers of the Novosibirsk state technical university]. 2016, no. 2 (84), pp. 116-130. (In Russian)
3. Levinstein M.L. *Protsessy pri odnofaznom avtomaticheskoy povtornom vkhlyuchenii linii vysokikh napryazhenii* [The processes of high voltage lines at single-phase automatic reclosing]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 256 p. (In Russian)
 4. Aleksandrov G.N. *Proektirovanie linii elektroperedachi sverkhvysokogo napryazheniya* [The design of superhigh voltage transmission lines]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1993. 560 p. (In Russian)
 5. Krasilnikova T.G., Manusov V.Z. The analysis of inflow arc currents in the pause of a single-phase automatic reclosing in the process of dynamic transition. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka* [Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East]. 2009, no. 1, pp. 313-316. (In Russian)
 6. Zelichenko A.S., Smirnov B.I. *Proektirovanie mekhanicheskoi chaste vozdukhnykh linii sverkhvysokogo napryazheniya* [Planning of mechanical part of overhead lines of extra high voltage]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 336 p. (In Russian)
 7. Barg I.G., Edelman V.I. *Vozdukhnye linii elektroperedachi: voprosy ekspluatatsii i nadezhnosti* [Overhead transmission lines: Issues of operation and reliability]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 248 p. (In Russian)
 8. Rashkes V.S. Generalisation of operational data of efficiency SPAR on EHV lines and experimental data of time of secondary arc extinction. *Elektricheskie stantsii* [Power stations]. 1989, no. 3, pp. 65-72. (In Russian).
 9. Krasilnikova T., Samorodov G. Analysis method for transient single-phase fault removal on EHV transposed transmission lines // 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) Proceedings, Novosibirsk, 2018, vol. 1, part 5, pp. 173-178.
 10. Goldberg S., Norton W.F., Tziouvas D. A Computer Model of the Secondary Arc in Single Phase Operation of Transmission Lines, *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 4, no. 1, January 1989.

Красильникова Т.Г., Махмудов К.А., Сафаралиев М.Х. Анализ ликвидации неустойчивых двухфазных коротких замыканий в транспонированных линиях СВН в цикле двухфазного автоматического повторного включения // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 4(49). С. 4-10. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4\(49\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-4-10)

Krasilnikova T.G., Makhmudov K.A., Safaraliev M.Kh. Analysis of Elimination of Unstable Two-Phase Short Circuits in Transposed Extra-High Voltage Lines in a Two-Phase Automatic Reclosing. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 4(49), pp. 4-10. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4\(49\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-4-10)