

## Сравнительный анализ способов ликвидации неустойчивых однофазных коротких замыканий в нетранспонированных линиях сверх- и ультравысокого напряжения

КРАСИЛЬНИКОВА Т.Г., ДЖОНОНАЕВ С.Г.

*Представлен анализ однофазных ОАПВ (ОАПВ) в линиях СВН и УВН сравнительно небольшой длины (100–200 км), которые по условию работы в нормальных режимах могут быть нетранспонированными. Показано, что в общем случае необходимо использование специальных мер для осуществления эффективного ОАПВ в нетранспонированных линиях. Рассмотрены сценарии, когда линии оборудованы четырехлучевыми шунтирующими реакторами (модифицированными или управляемыми), а в случае отсутствия реакторов используется автоматическое шунтирование фазы при проведении ОАПВ. Для расчета восстанавливаемых напряжений и вторичных токов дуги в паузу ОАПВ используются матричные модели элементов электропередачи в фазных координатах. Сформулированы необходимые условия для обеспечения успешного ОАПВ.*

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** нетранспонированные линии, высокое напряжение, шунтирующие реакторы, автоматическое повторное включение, шунтирование фазы, восстанавливаемое напряжение, дуга, вторичный ток

Линии сверхвысокого и ультравысокого напряжения (СВН и УВН) сравнительно небольшой длины по условию работы в нормальных режимах могут быть нетранспонированными. Однако проблема ликвидации наиболее вероятных неустойчивых однофазных коротких замыканий (ОКЗ) сохраняется.

На рис. 1 приведены зависимости вторичного тока дуги (ВТД), возникающего при отключении аварийной фазы нетранспонированной линии напряжением 750 и 1000 кВ при отсутствии на ней шунтирующего реактора (ШР). Для оценки длительности бестоковой паузы ОАПВ воспользуемся рекомендациями, приведенными в [1, 2].

При токах дуги более 90 А (ампл.) гашение вторичной дуги становится проблематичным. Наибольший эффект применение ОАПВ дает, если

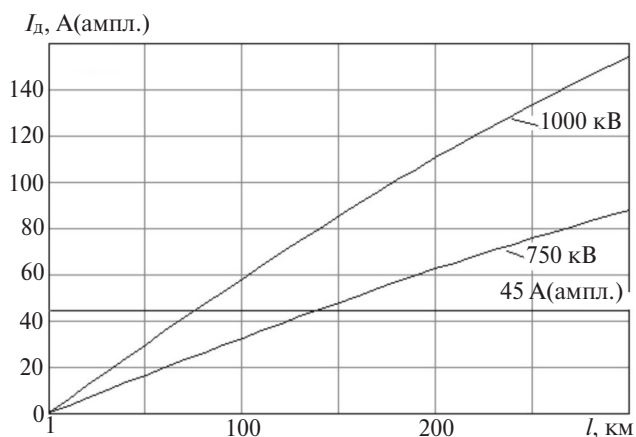


Рис. 1. Зависимость вторичного тока дуги от длины нетранспонированной линии

длительность паузы не превышает 0,5–1,0 с, для чего требуется ограничение вторичного тока дуги менее 20–45 А (ампл.)

Как видно из рис. 1, обеспечить эффективное гашение вторичной дуги при длительности паузы ОАПВ в пределах 1,0 сек можно лишь при длине линии менее 140 км для ВЛ 750 кВ и менее 70 км для ВЛ 1000 кВ. Поэтому в общем случае необходимо использование специальных мер для осуществления эффективного ОАПВ в нетранспонированных линиях.

Имеется ряд работ, посвященных проблеме ликвидации неустойчивых ОКЗ в нетранспонированных линиях [3–5]. В [3, 4] проблему ОАПВ предлагается решать с помощью модифицированных четырехлучевых ШР (МШР), а в [5] задача решается путём использования управляемых четырехлучевых ШР (УШР).

В статье на основе строгого алгоритма проводится детальный анализ ВТД и восстанавливаемых напряжений (ВН) в нетранспонированных линиях, который позволяет более углубленно рассмотреть проблему осуществления ОАПВ в таких линиях. При этом принимаются во внимание ограничения, связанные с допустимым уровнем напряжения на аварийной фазе в паузу ОАПВ.

**Алгоритм для определения ВН и ВТД в нетранспонированных линиях.** Режиму ОАПВ соответствует схема на рис. 2 при наличии одного ШР на линии. Предварительно рассмотрим математические модели отдельных элементов. Для линии примем рас-

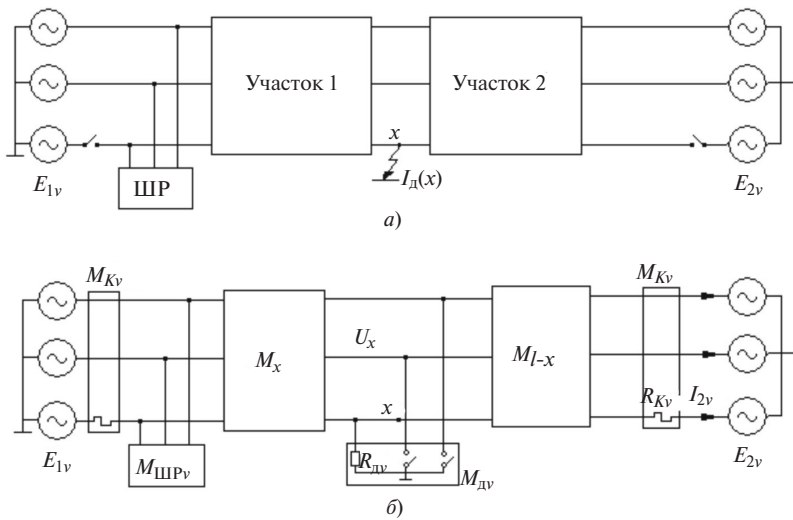


Рис. 2. Схема передачи для определения ВН и ВТД при ОАПВ: а – исходная; б – расчетная

пространственный случай горизонтального расположения фаз над землёй (рис. 3). Фазные матрицы участков нетранспонированной линии:

$$M_x = \begin{bmatrix} A_x & B_x \\ C_x & D_x \end{bmatrix}; M_{l-x} = \begin{bmatrix} A_{l-x} & B_{l-x} \\ C_{l-x} & D_{l-x} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где

$$A_x = \begin{bmatrix} A_{xa} & A_{xab} & A_{xac} \\ A_{xba} & A_{xb} & A_{xbc} \\ A_{xca} & A_{xcb} & A_{xc} \end{bmatrix};$$

$$A_{l-x} = \begin{bmatrix} A_{l-xa} & A_{l-xab} & A_{l-xac} \\ A_{l-xba} & A_{l-xb} & A_{l-xbc} \\ A_{l-xca} & A_{l-xcb} & A_{l-xc} \end{bmatrix};$$

$$B_x = \begin{bmatrix} B_{xa} & B_{xab} & B_{xac} \\ B_{xba} & B_{xb} & B_{xbc} \\ B_{xca} & B_{xcb} & B_{xc} \end{bmatrix};$$

$$B_{l-x} = \begin{bmatrix} B_{l-xa} & B_{l-xab} & B_{l-xac} \\ B_{l-xba} & B_{l-xb} & B_{l-xbc} \\ B_{l-xca} & B_{l-xcb} & B_{l-xc} \end{bmatrix};$$

$$C_x = \begin{bmatrix} C_{xa} & C_{xab} & C_{xac} \\ C_{xba} & C_{xb} & C_{xbc} \\ C_{xca} & C_{xcb} & C_{xc} \end{bmatrix};$$

$$C_{l-x} = \begin{bmatrix} C_{l-xa} & C_{l-xab} & C_{l-xac} \\ C_{l-xba} & C_{l-xb} & C_{l-xbc} \\ C_{l-xca} & C_{l-xcb} & C_{l-xc} \end{bmatrix};$$

$$D_x = \begin{bmatrix} D_{xa} & D_{xab} & D_{xac} \\ D_{xba} & D_{xb} & D_{xbc} \\ D_{xca} & D_{xcb} & D_{xc} \end{bmatrix};$$

$$D_{l-x} = \begin{bmatrix} D_{l-xa} & D_{l-xab} & D_{l-xac} \\ D_{l-xba} & D_{l-xb} & D_{l-xbc} \\ D_{l-xca} & D_{l-xcb} & D_{l-xc} \end{bmatrix}$$

– матричные фазные коэффициенты для соответствующих участков линии.

Для эффективного гашения вторичной дуги параметры ШР могут меняться в зависимости от того, в какой фазе ликвидируется дуга. В общем случае фазные матрицы сопротивлений и проводимостей шунтирующего реактора имеют вид согласно рис. 4:

$$Z_{ШРv} = \begin{bmatrix} Z_{pa} + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_{pb} + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_{pc} + Z_n \end{bmatrix};$$

$$Z_{ШРv} = Z_{ШРv}^{-1}. \quad (2)$$

Соответственно полная фазная матрица шунтирующего реактора

$$M_{ШРv} = \begin{bmatrix} \mathbf{1}_3 & \mathbf{0}_3 \\ Y_{ШРv} & \mathbf{1}_3 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где

$$\mathbf{0}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{1}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

– нулевая и единичная матрицы третьего порядка соответственно.

На рис. 5 приведена схема, моделирующая состояние выключателей по концам линии. Если  $R_v = 0$ , то это условие соответствует включенному состоянию фазы «v», при  $R_v \rightarrow \infty$  будет моделироваться отключенное состояние. При этом достаточно принять  $R_v = 10^6$  Ом. Соответственно полная матрица коммутаций в общем случае имеет вид:

$$M_{Kv} = \begin{bmatrix} \mathbf{1}_3 & R_{Kv} \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{1}_3 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где

$$R_{Kv} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix}$$

– матрица коммутации.

Для моделирования вторичной дуги используется матрица дуги. На рис. 5,б приведена схема, моделирующая дугу. Если  $R_{dv} = 10 \div 1000$  Ом, то это соответствует наличию дуги в фазе «v», при  $R_{dv} \rightarrow \infty$  будет моделироваться погасание дуги в

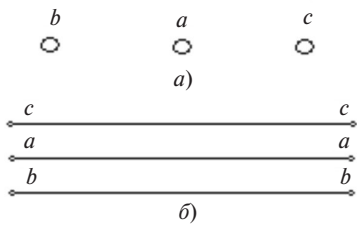


Рис. 3. Расположение линии в пространстве: а – горизонтальное расположение фаз на опоре; б – схема нетранспонированной линии

этой фазе. При этом в реальных условиях достаточно принять  $R_{дв} \approx 10^6$  Ом.

Соответственно полная матрица дуги в фазных координатах в общем случае имеет вид:

$$M_{дв} = \begin{bmatrix} \mathbf{1}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{G}_{дв} & \mathbf{1}_3 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

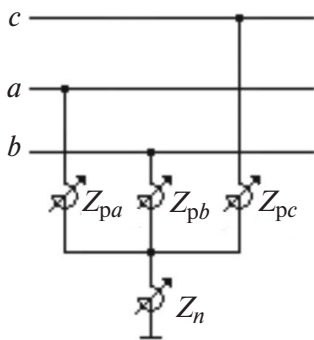


Рис. 4. Обобщенная схема шунтирующего реактора

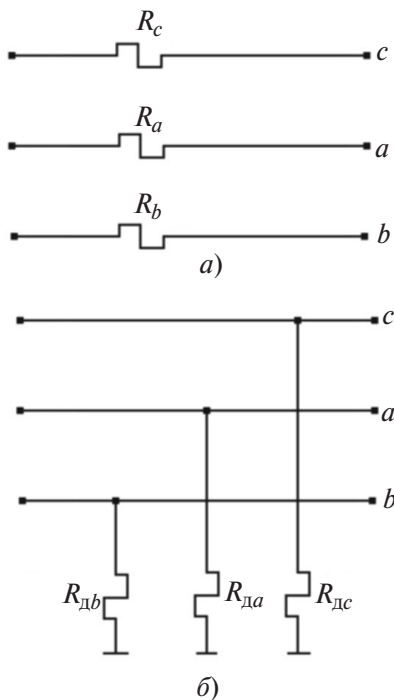


Рис. 5. Схема для моделирования состояния выключателя (а) и дуги (б)

где

$$G_{дв} = \begin{bmatrix} 1/R_{да} & 0 & 0 \\ 0 & 1/R_{дб} & 0 \\ 0 & 0 & 1/R_{дс} \end{bmatrix}$$

– матрица дуги для фазы  $v$ .

Далее приведен простой алгоритм в матричной форме для расчета ВТД и ВН при наличии вторичной дуги в произвольной точке линии на  $v$ -й фазе.

Определив полную матрицу схемы в целом:

$$M_v = \begin{bmatrix} A_v & B_v \\ C_v & D_v \end{bmatrix} = M_{Kv} M_{ШРv} M_x M_{дв} M_{l-x} M_{Kv}, \quad (6)$$

находим вектор-столбец токов в конце линии:

$$I_{2v} = B_v^{-1} (E_1 - A_v E_2), \quad (7)$$

где

$$E_1 = \begin{bmatrix} \dot{E}_{1a} \\ \dot{E}_{1b} \\ \dot{E}_{1c} \end{bmatrix}; \quad E_2 = \begin{bmatrix} \dot{E}_{2a} \\ \dot{E}_{2b} \\ \dot{E}_{2c} \end{bmatrix}$$

– вектор-столбцы конечных ЭДС.

Рассчитав далее полную матрицу между точкой  $x$  и концом линии:

$$M_{x2v} = \begin{bmatrix} A_{x2v} & B_{x2v} \\ C_{x2v} & D_{x2v} \end{bmatrix} = M_{l-x} M_{Kv},$$

находим вектор-столбец напряжений в точке  $x$ :

$$U_{xv} = A_{x2v}^{-1} E_2 + B_{x2v} I_{2v}. \quad (8)$$

Далее определяется искомый вторичный ток дуги применительно к  $v$ -й фазе:

$$I_{хдв} = U_{xv} / R_{дв}, \quad (9)$$

где  $R_{дв}$  – сопротивление вторичной дуги.

Условия для компенсации электростатической и электромагнитной составляющих ВТД в схеме с УШР. На рис. 6 приведена П-образная схема замещения нетранспонированной линии. В начале линии установлен УШР, и его параметры могут по-фазно изменяться.

Параметры преобразованной схемы УШР:

$$B_{раб} = \frac{B_{ра} B_{рб}}{B_{\Sigma}}; \quad B_{раc} = \frac{B_{ра} B_{рc}}{B_{\Sigma}}; \quad B_{рбc} = \frac{B_{рб} B_{рc}}{B_{\Sigma}};$$

$$B_{раz} = \frac{B_{ра} B_n}{B_{\Sigma}}; \quad B_{рбz} = \frac{B_{рб} B_n}{B_{\Sigma}}; \quad B_{рcз} = \frac{B_{рc} B_n}{B_{\Sigma}}, \quad (10)$$

где  $B_{\Sigma} = B_{ра} + B_{рб} + B_{рc} + B_n$ .

Полная электростатическая компенсация обеспечивается, если межфазовые проводимости преоб-

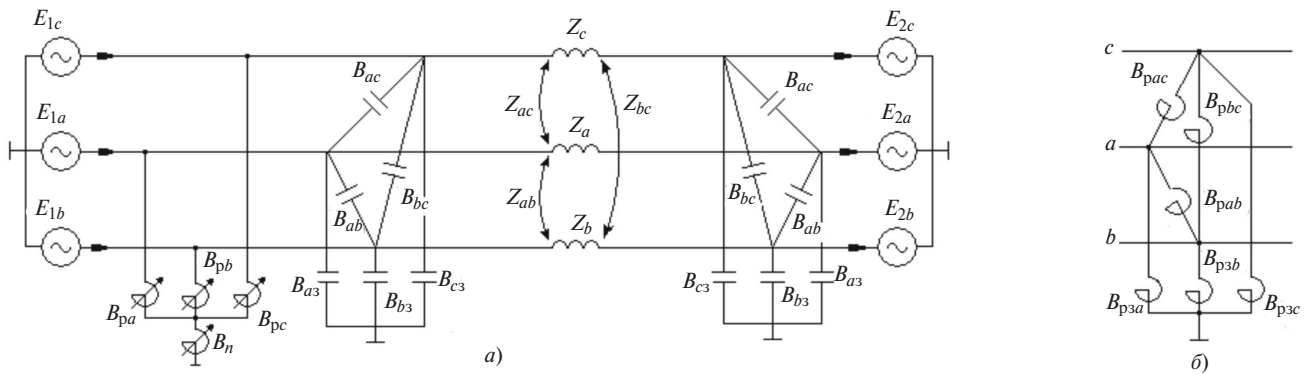


Рис. 6. Схема ЭП при представлении нетранспонированной линии П-образной схемой замещения: а – схема ЭП; б – преобразованная схема УШР

разованного ШР компенсируют соответствующие межфазовые проводимости в целом для линии:

$$-2B_{ab} = B_{pab} = \frac{B_{pa}B_{pb}}{B_{\Sigma}}; \quad -2B_{ac} = B_{pac} = \frac{B_{pa}B_{pc}}{B_{\Sigma}};$$

$$-2B_{bc} = B_{pbc} = \frac{B_{pb}B_{pc}}{B_{\Sigma}}. \quad (11)$$

Поскольку  $B_{ab} = B_{ac}$ , то из первых двух уравнений (11) следует:

$$B_{pb} = B_{pc}, \quad (12)$$

тогда из двух последних уравнений (11)

$$B_{pa} = K_{\text{эст}} B_{pb}, \quad (13)$$

где  $K_{\text{эст}} = B_{ac} / B_{bc} = 4 \div 5$  – отношение межфазной емкостной проводимости между средней и крайней фазами к межфазной емкостной проводимости между крайними фазами.

При фазных проводимостях реактора, удовлетворяющих условиям (12) и (13), из любого из уравнений системы (11), например из второго уравнения, определяется проводимость нейтрального реактора:

$$B_n = -(B_{pa} + B_{pb} + B_{pc}) - \frac{B_{pa}B_{pc}}{2B_{ac}}.$$

Полная электромагнитная компенсация обеспечивается, если фазовые проводимости на землю преобразованного ШР компенсируют соответствующие фазовые проводимости для половины линии:

$$-B_{a3} = B_{pa3} = \frac{B_{pa}B_n}{B_{\Sigma}}; \quad -B_{b3} = B_{pb3} = \frac{B_{pb}B_n}{B_{\Sigma}};$$

$$-B_{c3} = B_{pc3} = \frac{B_{pc}B_n}{B_{\Sigma}}. \quad (14)$$

Поскольку  $B_{b3} = B_{c3}$ , то из последних двух уравнений системы (14) следует:

$$B_{pb} = B_{pc}, \quad (15)$$

тогда из двух первых уравнений системы (14):

$$B_{pa} = K_{\text{элм}} B_{pb}, \quad (16)$$

где  $K_{\text{элм}} = B_{a3} / B_{b3} = 1,0 \div 1,1$  – отношение фазной проводимости на землю для средней фазы к фазной проводимости на землю для крайних фаз.

Значительное различие между  $K_{\text{эст}}$  и  $K_{\text{элм}}$  означает, что обеспечить одновременно полную электростатическую и электромагнитную компенсацию с помощью УШР невозможно. Однако оптимальное соотношение фазных параметров реактора существует в диапазоне  $K_{\text{элм}} \div K_{\text{эст}}$ , которое определяет наименьшее значение ВТД:

$$K_{\text{opt}} = B_{pa\text{opt}} / B_{pb}. \quad (17)$$

Следует подчеркнуть, что проводимости фаз *b* и *c* остаются неизменными, соответствующими номинальному значению, а проводимость фазы *a* изменяется при ОАПВ в каждой из фаз так, чтобы обеспечивался минимально возможный ВТД.

**Схема МШР для снижения ВТД.** Эффективный вариант снижения ВТД был предложен в [3, 4] с помощью МШР, обеспечивающего в зависимости от аварийной фазы коммутационные переключения в реакторе таким образом, что в наибольшей степени осуществляется лишь компенсация межфазовых проводимостей между средней и крайними фазами, поскольку именно они дают определяющую подпитку со стороны «здоровых» фаз. На рис. 7 показана схема МШР и порядок коммутации выключателей в зависимости от аварийной фазы. Соответствующие матрицы параметров модифицированного четырехлучевого шунтирующего реактора в зависимости от аварийной фазы имеют вид:

$$Z_{pa} = \begin{vmatrix} Z_p + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_p + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_p + Z_n \end{vmatrix}, Y_{pa} = Z_{pa}^{-1} \rightarrow$$

ОАПВ в фазе a;

$$Z_{pb} = \begin{vmatrix} Z_p + Z_n & Z_n & 0 \\ Z_n & Z_p + Z_n & 0 \\ 0 & 0 & Z_p \end{vmatrix}, Y_{pb} = Z_{pb}^{-1} \rightarrow$$

ОАПВ в фазе b;

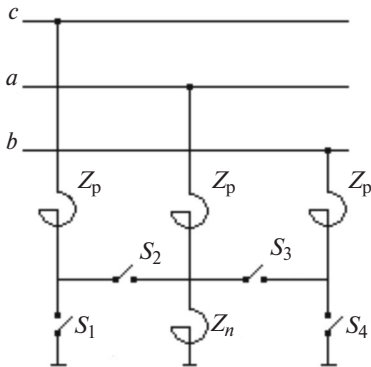
$$Z_{pc} = \begin{vmatrix} Z_p + Z_n & 0 & Z_n \\ 0 & Z_p & 0 \\ Z_n & 0 & Z_p + Z_n \end{vmatrix}, Y_{pc} = Z_{pc}^{-1} \rightarrow$$

ОАПВ в фазе c.

**Анализ ВТД и ВН в нетранспонированных линиях при наличии шунтирующего реактора.** В первую очередь рассмотрим необходимые условия для обеспечения успешного ОАПВ. Пауза успешного ОАПВ прогнозируется в пределах 0,5–1,0 с, если ВТД будет удовлетворять условию

$$I_d \leq 20 \div 45 \text{ А(ампл.)}. \tag{18}$$

Второе обстоятельство, которое следует учитывать, — это создание допустимых условий работы ОПН в паузу ОАПВ. После погасания дуги начинается процесс восстановления напряжений на аварийной фазе, который имеет характер биений:



Аварийная фаза	Состояние выключателей			
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>
a	О	В	В	О
b	В	О	В	О
c	О	В	О	В

Рис. 7. Схема модифицированного четырехлучевого шунтирующего реактора и порядок коммутации выключателей (О – отключенное состояние; В – включенное)

$$U_{вн}(t) = U_{вн} K_б(t),$$

где  $U_{вн}$  – вынужденная составляющая напряжения в месте установки ОПН.

В общем случае продолжительность воздействия на ОПН максимальных ВН в паузу ОАПВ составляет 0,15–0,5 с. С другой стороны, по условию безопасной работы ОПН допускаются повышения такой длительности не более  $(1,55 \div 1,45)U_{\phi}$ , где  $U_{\phi}$  – максимальное рабочее фазное напряжение [1].

Принимая максимальное значение коэффициента биений с учетом затухания  $K_{max} = 1,9$  и допустимое напряжение на ОПН  $U_{доп} = 1,45U_{\phi}$ , найдем допустимое значение вынужденной составляющей напряжения в паузу ОАПВ соответственно для линий 750 и 1000 кВ:

$$U_{доп750} = 340 \text{ кВ}; U_{доп1000} = 460 \text{ кВ}. \tag{19}$$

Условия гашения вторичной дуги в паузу ОАПВ в нетранспонированных линиях 750 и 1000 кВ при их длине 100 и 200 км в случае использования УШР и МШР проанализируем на основе приведенного выше алгоритма.

Дальнейший анализ проводится применительно к ВЛ со следующими параметрами:

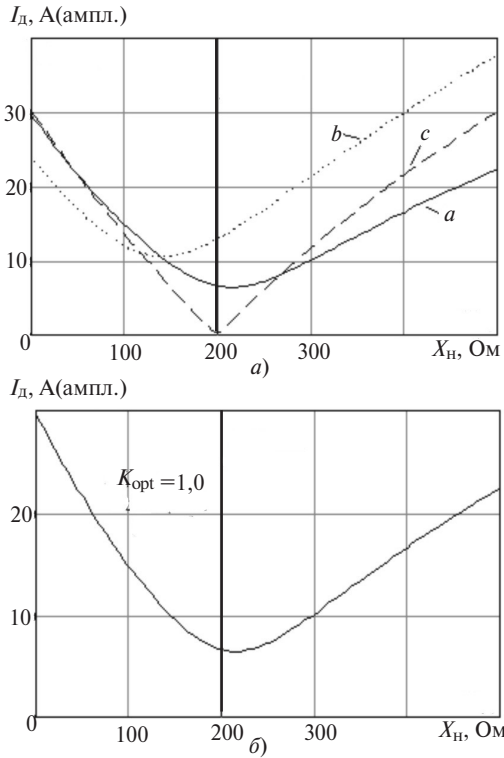
Параметр	Напряжение линии	
	750 кВ	1000 кВ
Расстояние, м		
между соседними фазами $D_{\phi}$	17	22
между тросами $D_T$	20	37
Средняя высота подвеса, м		
фаз над землей $H_{\phi}$	16	28
тросов над землей $H_T$	20	37
Шаг расщепления $d$ , м	0,40	0,45
Конструкция		
фазы	5×AC-400	8×AC-600
троса	2×AC-70	AC-240

В схемах с ШР ВТД слабо зависит от сопротивления вторичной дуги в диапазоне его изменения 10÷1000 Ом. В дальнейших расчетах сопротивление дуги принято 500 Ом.

**Вариант А: 750 кВ, 100 км.** Согласно российским данным номинальная мощность ШР составляет 330 Мвар. В этом случае при длине 100 км степень компенсации равна 130%.

При использовании МШР минимальные ТДП имеют место (рис. 8,а) при сопротивлении нейтрального реактора 200 Ом. При этом условии приемлемого уровня ВН при ОАПВ во всех фазах выполняется.

При применении УШР необходимо определить не только оптимальное сопротивление нейтрального реактора, но и соотношение фазных проводимостей реактора для минимизации ВТД. В первую очередь эти оптимальные параметры определяются



**Рис. 8.** Зависимость ВТД от сопротивления нейтрального реактора: *a* – при ОАПВ в различных фазах в схеме с МШР (конец ВЛ,  $\delta = 12^\circ$ ); *б* – при оптимальном соотношении фазных параметров реактора при ОАПВ в фазе *a* для схемы с УШР

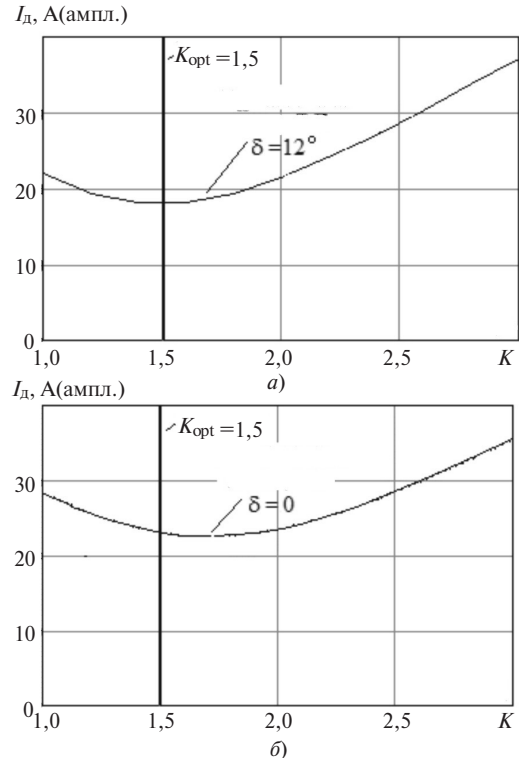
для случая ОАПВ в фазе *a* (рис. 8,б), занимающей среднее положение. Далее определяются оптимальные параметры УШР для случаев ОАПВ в фазах *b* и *c*, как это показывает рис. 9. При этом условие по режиму напряжений (19) выполняется с запасом.

Основные результаты расчетов приведены в табл. 1, которые показывают, что использование МШР и УШР с точки зрения осуществления ОАПВ дает близкий эффект.

Таблица 1

Тип ШР	Аварийная фаза	$K_{opt}$	$X_n$ , Ом	Вторичный ток дуги, А (ампл.)	$t_{OAPB}$ , с
МШР	<i>a</i>	–	200	6,6	0,52
	<i>b</i>	–		13,0	
	<i>c</i>	–		6,5	
УШР	<i>a</i>	1,0	200	6,6	0,62
	<i>b</i>	1,5		18,1	
	<i>c</i>	1,5		24,7	

**Вариант В:** 750 кВ, 200 км. При номинальной мощности ШР 330 МВар и длине линии 200 км степень компенсации зарядной мощности линии в нормальном режиме составляет 65%. Основные результаты расчетов, удовлетворяющие условиям (18) и (19), приведены в табл. 2.



**Рис. 9.** Определение оптимальных параметров УШР для случаев ОАПВ ( $X_n = 200$  Ом, конец ВЛ): *a* – в фазе *b*; *б* – в фазе *c*

Таблица 2

Тип ШР	Аварийная фаза	$K_{opt}$	$X_n$ , Ом	ВТД, А (ампл.)	$t_{OAPB}$ , с
МШР	<i>a</i>	–	400	34,2	0,77
	<i>b</i>	–		25,0	
	<i>c</i>	–		32,3	
УШР	<i>a</i>	1,5	400	13,7	0,73
	<i>b</i>	1,8		30,7	
	<i>c</i>	2,0		32,0	

**Вариант С:** 1000 кВ, 100 км. Минимальная номинальная мощность ШР в линиях 1000 кВ по данным [5] составляет 420 Мвар, что при длине линии 100 км обеспечивает степень компенсации зарядной мощности линии 80%. Основные результаты расчетов, удовлетворяющие условиям (18) и (19), приведены в табл. 3.

Таблица 3

Тип ШР	Аварийная фаза	$K_{opt}$	$X_n$ , Ом	ВТД, А (ампл.)	$t_{OAPB}$ , с
МШР	<i>a</i>	–	750	15,3	0,54
	<i>b</i>	–		15,0	
	<i>c</i>	–		13,5	
УШР	<i>a</i>	1,6	650	5,7	0,59
	<i>b</i>	2,0		20,0	
	<i>c</i>	2,2		20,9	

Как видно, использование МШР или УШР с точки зрения осуществления ОАПВ дает практически одинаковый результат.

*Вариант D: 1000 кВ, 200 км.* Номинальная мощность ШР по данным [5] принята 720 Мвар, что при длине линии 200 км обеспечивает степень компенсации зарядной мощности линии в нормальном режиме 68%.

Основные результаты анализа режима ОАПВ при использовании МШР или УШР с учетом ограничений (18, 19) приведены в табл. 4. Приведенные данные показывают, что использование УШР или МШР с точки зрения осуществления ОАПВ в данном случае идентично.

Таблица 4

Тип ШР	Аварийная фаза	$K_{опт}$	$X_n$ , Ом	ВТД, А (ампл.)	$t_{ОАПВ}$ , с
МШР	<i>a</i>	—	550	42,2	0,92
	<i>b</i>	—		36,3	
	<i>c</i>	—		36,8	
УШР	<i>a</i>	1,5	500	21,8	0,92
	<i>b</i>	2,2		42,0	
	<i>c</i>	2,5		35,0	

**Анализ ВТД и ВН в нетранспонированных линиях без шунтирующего реактора.** В тех случаях, когда в примыкающих системах имеются достаточные запасы реактивной мощности, нет необходимости устанавливать ШР в линиях сравнительно небольшой длины, по крайней мере, в пределах 200 км.

Для ликвидации неустойчивых ОКЗ в этом случае может быть использовано ОАПВ, основанное на автоматическом шунтировании аварийной фазы (АШФ) с помощью быстродействующих шунтирующих выключателей [6].

На рис. 10 приведена схема ОАПВ с АШФ. При возникновении ОКЗ на линии аварийная фаза отключается линейными выключателями *B1* и *B2* и затем с минимальной задержкой шунтируется по концам линии шунтирующими выключателями *ШВ1* и *ШВ2*. В результате создаются благоприятные условия для гашения вторичной дуги. В конце

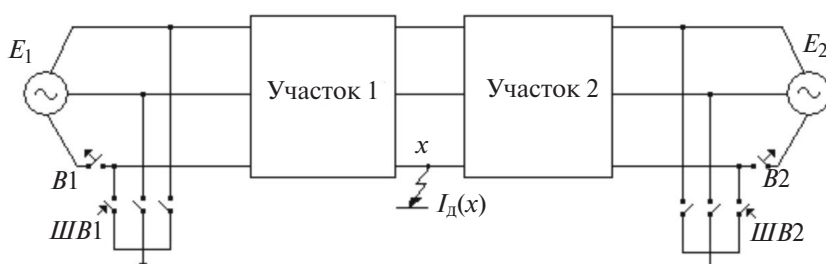


Рис. 10. Схема реализации ОАПВ с автоматическим шунтированием фазы

паузы ОАПВ с АШФ происходит расшунтирование фазы, и с минимально возможной задержкой включаются линейные выключатели.

Для расчетов в этой схеме также может быть получен простой алгоритм в матричной форме для расчета ВТД и ВН при наличии вторичной дуги в произвольной точке линии на *v*-й фазе подобно тому, как это было сделано для схем с ШР.

Результаты расчетов режима ОАПВ ( $t_{ОАПВ}=0,5$  с) с использованием АШФ в нетранспонированных линиях приведены в табл. 5. Проведенный анализ показал, что в промежутке между расшунтированием фазы и включением линейных выключателей (период расшунтирования), который составляет (0,2÷0,3) с, условие (19) выполняется.

Таблица 5

Номинальное напряжение, кВ	Длина линии, км	ВТД для аварийных фаз, А (ампл.)		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
750	100	0,66	0,59	0,59
	200	2,6	2,3	2,3
1000	100	0,82	0,72	0,72
	200	3,2	2,9	2,9

Таким образом, ОАПВ с АШФ оказывается эффективной мерой для ликвидации неустойчивых ОКЗ, позволяющей иметь минимальную паузу ОАПВ 0,5 с.

**Выводы.** 1. Результаты проведенных расчетов показали, что использование модифицированных четырехлучевых шунтирующих реакторов либо управляемых четырехлучевых шунтирующих реакторов с точки зрения осуществления ОАПВ дает близкий эффект и позволяет иметь длительность паузы ОАПВ в пределах 0,5÷1,0 с.

2. В нетранспонированных линиях, не оснащенных шунтирующими реакторами, эффективной мерой для ликвидации неустойчивых однофазных коротких замыканий оказывается ОАПВ с автоматическим шунтированием аварийной фазы, позволяющее иметь минимальную паузу ОАПВ 0,5 с.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения/Под ред. Г.Н. Александрова. — Л.: Энергоатомиздат, 1993, 560 с.
2. Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России. Теоретические и практические вопросы. Т. 1. Электропередачи переменного тока/Под общ. ред. А.Ф. Дьякова. — М.: НТФ «Энергопрогресс», 2012, 696 с.
3. Shperling B.R., Fakhery A., Ware B.J. Compensation Scheme for Single-pole Switching

on Untransposed Transmission Lines. — IEEE Trans. on Power Apparatus and System, July/Aug. 1978, vol. PAS-97, No. 4, pp. 1421–1429.

4. **Shperling B.R., Fakhery A.** Single-pole Switching Parameters for Untransposed EHV Transmission Lines. — IEEE Trans. on Power Apparatus and System, March/April 1979, vol. PAS-98, No. 2, pp. 643–654.

5. **Qiyang Ma, Bin Zheng, Liangeng Ban, and Zutao Xiang.** Secondary Arc Current of an Untransposed EHV/UHV Transmission line with Controllable Unbalanced Shunt Reactor. — IEEE Trans. on Power Delivery, June 2015, vol. 30, No. 3, pp. 1458–1466.

6. **Hasibar R.M., Legate A.C., Brunke J.H. Peterson W.G.** The Application of High-Speed Grounding Switches for Single-Pole Reclosing on 500-kV Power System. — IEEE Trans. on Power Apparatus and System, April, 1981, vol. PAS-100, No. 4, pp. 1512–1515.

[12.04.2017]

*Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 11, pp. 22–29*

*DOI:10.24160/0013-5380-2017-11-22-29*

## Comparative Analysis of Ways of Transient Single Line to Ground Fault Removal on EHV and UHV Transmission Untransposed Lines

**KRASIL'NIKOVA Tat'yana G.** (Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk, Russia) — Professor

**DZHONONAYEV Sayid G.** (NSTU, Novosibirsk, Russia) — Ph. D. Student

*In this paper the analysis of single-phase auto-reclosing on EHV and UHV untransposed lines equipped four-legged shunt reactors (modified or controlled) and as well high-speed grounding switches when lines without shunt reactors is presented. It is shown that in the general case the use of special measures for effective single-phase auto-reclosing in untransposed lines are required. To calculate recovery voltage and secondary arc current are used the matrix models of transmission system elements in phase coordinates. The necessary conditions to ensure the successful single-phase auto-reclosing are formulated.*

**Key words:** *untransposed lines, shunt reactor, automatic phase shunting, single-phase auto-reclosing, recovery voltage, secondary arc current*

### REFERENCES

1. **Proyektirovaniye linii elektroperedachi sverkhvysokogo napryazheniya/Pod red. G.N. Aleksandrova** (The line design of ENV transmission lines/Edit. by G.N. Alexandrov). Leningrad, Energoatomizdat, 1993, 560 p.

2. **Elektricheskiye seti sverkh- i ul'travysokogo napryazheniya EES Russia. Teoreticheskiye i prakticheskiye voprosy. T.1. Elektroperedachi peremennogo toka/Pod obshch. red. A.F. D'yakova** ( Electric networks of super- and ultra-high voltage UES of Russia. Theoretical and practical issues. Vol. 1. Power AC/Edit. by A.F. D'yakov). Moscow, Publ. «Energoprogress», 2012, 696 c.

3. **Shperling B.R., Fakhery A., Ware B.J.** Compensation Scheme for Single-pole Switching on Untransposed Transmission Lines. — IEEE Trans. on Power Apparatus and System, July/Aug. 1978, vol. PAS-97, No. 4, pp. 1421–1429.

*А в т о р ы: Красильникова Татьяна Германовна окончила в 1987 г. электроэнергетический факультет Новосибирского электротехнического института. В 2013 г. защитила докторскую диссертацию «Разработка четырехфазной технологии передачи электроэнергии на дальние расстояния». Профессор кафедры автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета (НГТУ).*

*Джононаев Сайёд Гулмуродович окончил в 2009 г. Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими. Аспирант кафедры автоматизированных электроэнергетических систем НГТУ.*

[12.04.2017]