

На страницах журнала не раз заходил разговор об управляемых шунтирующих реакторах (УШР). При установке УШР на воздушных линиях одним из серьезных вопросов, которые приходится решать на стадии проектирования, является расчет однофазного автоматического повторного включения этих линий, ограничение токов и напряжений до приемлемых значений.

В своей новой статье исследованиями в этой области делаются наши постоянные авторы.

ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ С УШР

Однофазное автоматическое повторное включение

Большинство коротких замыканий (КЗ) на ВЛ 330–750 кВ – однофазные, поэтому на таких линиях используют однофазное ОПВ (ОАПВ), прибегая к трехфазному (ТАПВ) в случае неуспешности ОПВ или при многофазных повреждениях.

В цикле ОПВ после двустороннего отключения от сети аварийной фазы ВЛ, в месте КЗ продолжает гореть электрическая дуга, получая подпитку от неотключенных фаз линии, и повторное включение должно быть осуществлено после самопогасания дуги, так как в противном случае ОПВ будет неуспешным и потребует полного трехфазного отключения ВЛ от сети.

Наибольшая вероятность успешного ОАПВ будет [1, 2] во-первых, при малых токах подпитки, и, во-вторых, при отсутствии повторных пробоев в месте КЗ после гашения дуги, что зависит от уровня восстанавливающегося напряжения.

В последнее время в сетях высокого напряжения находят применение не только ШР традиционной конструкции, но и так называемые управляемые шунтирующие реакторы (УШР) [3]. Ниже приведены простые аналитические выражения для расчета тока подпитки и восстанавливающегося напряжения в цикле ОАПВ на ВЛ с реакторами разного типа. Токи и напряжения при необходимости могут быть уточнены при помощи детального компьютерного моделирования процессов в программе АТР/ЕМТР, для которой в последнее время специально были разработаны подробные модели УШР [4] различных классов напряжения и мощности, а также модель открытой дуги, основанная на решении уравнения баланса энергии дугового столба.

ТОК ПОДПИТКИ В ЦИКЛЕ ОАПВ

Величина тока подпитки носит статистический характер, обусловленный такими случайными факторами, как фаза линии, на которой произошло КЗ; угол между напряжениями по концам линии, зависящий от значения передаваемой мощности; расположение места повреждения на линии; число и расположение на линии (по концам) шунтирующих реакторов; уровень рабочего напряжения; длина дугового промежутка и погодные условия. Гашение дуги подпитки зависит от случайного значения аperiodической составляющей тока подпитки.

На рис. 1 показана ВЛ с присоединенными ШР и УШР, на которой в момент времени «1» возникает однофазное КЗ на фазе А, отключаемое в моменты «2» и «3» головными выключателями линии, после чего в месте повреждения ВЛ перестает протекать ток КЗ сети и начинает проходить суммарный ток подпитки $I_{\text{СУМ}}$.

Помимо токов от ШР и УШР, суммарный ток подпитки в месте повреждения определяется электростатической (емкостной) и электромагнитной составляющими. Первая обусловлена наличием на здоровых фазах ВЛ рабочего напряжения сети, а вторая – передаваемой по здоровым фазам мощностью.

В обозначениях рис. 1 суммарный ток подпитки $I_{\text{СУМ}}$ определяется как:

$$I_{\text{СУМ}} = (I_{\text{ЭС}} + N_{\text{ШР}} I_{\text{ШР}} + N_{\text{УШР}} I_{\text{УШР}}) + (I_{\text{ЭМ}}), \quad (1)$$

где $I_{\text{ЭС}}$ и $I_{\text{ЭМ}}$ – электростатическая и электромагнитная составляющие;

$I_{\text{ШР}}$ и $I_{\text{УШР}}$ – токи подпитки от ШР и УШР;

$N_{\text{ШР}}$ и $N_{\text{УШР}}$ – число ШР и УШР на ВЛ.

Суммарный ток подпитки $I_{\text{СУМ}}$ имеет две составляющие, каждая из которых в (1) помещена в круглые скобки: первая

определяется рабочим напряжением на здоровых фазах ВЛ (подпитка через емкости ВЛ, через ШР и УШР), вторая определяется током здоровых фаз ВЛ. Как правило, угол между составляющими близок к 90 градусам, что позволяет находить величину тока подпитки:

$$I_{\text{СУМ}} = |I_{\text{СУМ}}| = \sqrt{(I_{\text{ЭС}} + N_{\text{ШР}} I_{\text{ШР}} + N_{\text{УШР}} I_{\text{УШР}})^2 + (I_{\text{ЭМ}})^2}.$$

Электростатическая составляющая тока подпитки

На рис. 2 показана емкостная схема замещения ВЛ в паузу ОАПВ, где введены обозначения: $B_{\text{М}}$ – междуфазная емкостная проводимость ВЛ, B_0 – собственная емкостная проводимость фазы на землю. Для многократно транспонированной линии указанные проводимости не зависят от фазы ВЛ (А, В, С).

Полагая напряжение в начале и в конце линии одинаковым по величине и углу, несложно записать:

$$I_{\text{ЭС}} = (\dot{U}_B - \dot{U}_A) \cdot (jB_{\text{М}}) + (\dot{U}_C - \dot{U}_A) \cdot (jB_{\text{М}}),$$

где $B_{\text{М}} = B_{\text{М}}^* \cdot L_{\text{ВЛ}}$, $L_{\text{ВЛ}}$ – длина ВЛ (км), $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

Учитывая $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$, а также и $\dot{U}_A = 0$, $\dot{U}_B = \dot{E}_B$, $\dot{U}_C = \dot{E}_C$, получим:

$$I_{\text{ЭС}} = -jB_{\text{М}}^* \cdot L_{\text{ВЛ}} \cdot \dot{E}_A, \quad (2)$$

где $|\dot{E}_A| = U_{\text{НР}} \sqrt{2/3}$ – амплитуда фазного значения наибольшего рабочего напряжения $U_{\text{НР}}$ сети (здесь и далее будут приводиться формулы и результаты расчетов для амплитудных значений составляющих суммарного тока подпитки).

Погонная междуфазная емкостная проводимость может быть найдена как:

$$B_1 = \omega C_1^* = \omega / (v_1 Z_{\text{ВЛ}}); B_0^* = B_S^* = \omega C_0^* = \omega / (v_0 Z_{\text{ВЛ}});$$

$$B_{\text{М}}^* = (B_1^* - B_0^*) / 3,$$

где $Z_{\text{ВЛ}} = 250 \div 400$ Ом (согласно [1]) и $Z_{\text{ВЛ}} \approx 2 \cdot Z_{\text{ВЛ}} -$ волновые сопротивления ВЛ по прямой и нулевой последовательностям;

$v_1 = 3 \cdot 10^8$ м/с и $v_0 = v_1 / 1,5$ – скорости распространения электромагнитной волны вдоль ВЛ по прямой и нулевой последовательностям;

$$\omega = 2\pi f = 314 \text{ рад/с}.$$

Например, для ВЛ 500 кВ с горизонтальным расположением фазных проводов справедливо $Z_{\text{ВЛ}} = 270$ Ом, и по формуле (2) получим электростатическую составляющую тока подпитки около 15 А на каждые 100 км длины линии (табл. 1).

Составляющая тока подпитки от ШР

Традиционным способом подавления тока подпитки в электропередачах напряжений 330–750 кВ является установка в нейтраль ШР дополнительного компенсационного реактора [1, 2].

В схеме рис. 1 в паузу ОАПВ во время горения дуги ток подпитки от каждого ШР может быть найден как:

$$I_{\text{ШР}} = j \frac{E_A}{X_1^{\text{ШР}}} \cdot \frac{X_N^{\text{ШР}}}{X_1^{\text{ШР}} + 3 X_N^{\text{ШР}}}, \quad (3)$$

где $X_1^{\text{ШР}} = U_{\text{НР}}^2 / Q_{\text{ШР}}$ – индуктивное сопротивление фазы реактора на промышленной частоте по прямой последовательности (сопротивление нулевой последовательности не вводится, поскольку $X_0^{\text{ШР}} = X_1^{\text{ШР}}$);

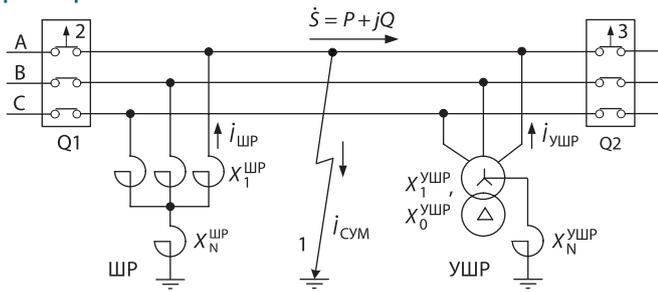
$X_N^{\text{ШР}}$ – сопротивление 4-го луча.

Андрей Долгополов, д.т.н.
Денис Кондратенко
ОАО «ЭЛТР», г. Москва

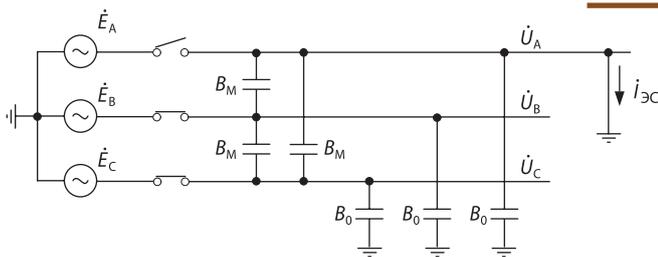
Михаил Дмитриев, к.т.н.
ЗАО «Завод энергозащитных устройств»

Георгий Евдокунин, д.т.н.
Евгений Шескин
СПбГПУ,
г. Санкт-Петербург

ОАПВ на ВЛ с присоединенными шунтирующими реакторами **Рис. 1**



Емкостная схема замещения ВЛ в паузу ОАПВ **Рис. 2**



Электростатическая составляющая тока подпитки для типовой ВЛ 500 кВ **Таблица 1**

$L_{ВЛ}, \text{ км}$	0	100	200	300	400	500
$I_{ЭС}, \text{ А}$	0	15	30	45	60	75

Подпитка дуги от ШР 500 кВ в паузу ОАПВ **Таблица 2**

$X_N^ШР, \text{ Ом}$	0	50	100	150	200	250	300
$I_{ШР}, \text{ А}$	0	8	15	21	26	31	35

Сравнив токи (2) и (3), увидим, что подпитка от ШР с 4-м лучом в нейтрали противоположна по знаку емкостной составляющей тока $I_{ЭС}$ и может частично или полностью ее компенсировать. В качестве примера для ШР 500 кВ, имеющего $U_{НР} = 525 \text{ кВ}$ и $Q_{ШР} = 180 \text{ МВАр}$, в табл. 2 представлены результаты расчетов, откуда, в частности, видно, что в случае отсутствия 4-го луча обычный ШР не влияет на ток подпитки в паузу ОАПВ.

Составляющая тока подпитки от УШР

УШР имеет обмотки, соединенные в треугольник. В зависимости от типа УШР в треугольник соединяют или обмотки управления, или компенсационные обмотки. Это приводит к тому, что УШР увеличивает суммарный ток подпитки. Для снижения негативного влияния УШР на ток подпитки в паузу ОАПВ принципиально можно использовать один из четырех способов:

1. **Отсутствие коммутаций УШР, установка 4-го луча УШР:**

$$\dot{I}_{УШР} = j \frac{\dot{E}_A}{3} \left[\frac{1}{X_1^{УШР}} - \frac{1}{X_0^{УШР} + 3X_N^{УШР}} \right]. \quad (4.1)$$

2. **Размыкание треугольника обмоток УШР, установка 4-го луча УШР:**

$$\dot{I}_{УШР} = j \frac{\dot{E}_A}{X_1^{УШР}} \cdot \frac{X_N^{УШР}}{X_0^{УШР} + 3X_N^{УШР}}. \quad (4.2)$$

3. **Шунтирование треугольника обмоток УШР, установка 4-го луча УШР:**

$$\dot{I}_{УШР} = j \frac{\dot{E}_A}{X_0^{УШР}} \cdot \frac{X_N^{УШР}}{X_0^{УШР} + 3X_N^{УШР}}. \quad (4.3)$$

4. **Отключение от линии фазы УШР, одноименной с поврежденной фазой ВЛ (4-й луч УШР на ток не влияет и поэтому здесь не используется):**

$$\dot{I}_{УШР} = 0. \quad (4.4)$$



Продукция нового поколения

Отличительные особенности НКУ «АССОЛЬ»:

- Широкий диапазон номинальных параметров (номинальные токи до 7100 А, до 100 кА)
- Масштабируемость. Изготовление любых низковольтных электроустановок
- Модульная архитектура. Любая конфигурация с различными вариантами разделения ячеек
- Высокая надежность. Применение современного оборудования ведущих мировых производителей
- Простота, удобство и безопасность обслуживания
- Современный привлекательный дизайн

Power and productivity for a better world™ **ABB**

194292, Россия, Санкт-Петербург, Парнас, 3-й Верхний пер., д. 12, лит. А
Тел./факс: +7 (812) 702-12-62. E-mail: sales@electronmash.ru

www.electronmash.ru
www.abb.ru

• Таблица 3. Подпитка дуги от УШР 500 кВ при шунтировании стороны треугольника (расчет по (4.3)). Сопротивление 4-го луча варьируется в диапазоне от 0 до 300 Ом

$X_N^{УШР}, \text{ Ом}$	0	50	100	150	200	250	300
$I_{УШР}, \text{ А}$	0	24	42	56	67	76	84

• Таблица 4. Наибольшая электромагнитная составляющая тока подпитки для типовой ВЛ 500 кВ

$L_{ВЛ}, \text{ км}$	0	100	200	300	400	500
$I_{ЭМ} / I_A$	0	$2,7 \cdot 10^{-3}$	0,011	0,025	0,044	0,068
$I_{ЭМ}, \text{ А}$ при $I_A = 1550 \text{ А}$	0	4	17	38	68	106

В формулах использованы обозначения:
 $X_1^{УШР} = U_{НР}^2 / Q_{УШР}$ – индуктивное сопротивление УШР по прямой последовательности;
 $Q_{УШР}$ – текущая трехфазная мощность УШР на время ОАПВ;
 $X_0^{УШР}$ – индуктивное сопротивление УШР нулевой последовательности, определяемое его конструкцией;
 $X_N^{УШР}$ – сопротивление 4-го луча.

Сравнивая токи (2) и (4), мы видим, что подпитка от УШР с 4-м лучом в нейтрали практически во всех случаях противоположна по знаку емкостной составляющей $I_{ЭС}$ и может частично или полностью ее компенсировать за исключением 1-го случая, в котором ток УШР совпадает по знаку с $I_{ЭС}$, поскольку для реакторов характерно $X_1^{УШР} > (X_0^{УШР} + 3 X_N^{УШР})$.

На рис. 3, 4 и в табл. 3 рассмотрены соответственно 1-й, 2-й и 3-й способы борьбы с токами подпитки. Все расчеты выполнены на примере типовой УШР 500 кВ, разработанного ОАО «Электрические управляемые реакторы» и производимого ОАО «Запорожтрансформатор» [3], имеющего диапазон регулирования потребляемой мощности $Q_{УШР} = 0-180 \text{ МВАр}$ (возможна перегрузка до 30% на короткое время), $X_0^{УШР} = 845 \text{ Ом}$.

Согласно рис. 3 снижение негативного влияния УШР на суммарный ток может быть достигнуто форсированием его мощности на время ОАПВ с одновременным использованием 4-го луча сопротивлением около 200 Ом.

Электромагнитная составляющая тока подпитки

На рис. 5 показана схема для определения электромагнитной составляющей тока подпитки, где введены обозначения: X_S^* – погонное значение собственного продольного индуктивного сопротивления фазы ВЛ; $L_{КЗ}$ и $(L_{ВЛ} - L_{КЗ})$ – расстояние от начала (Н) и конца (К) линии до места короткого замыкания; $X_{СН} = 1 / B_{СН} = 2 / (B_0^* L_{КЗ})$ – емкостное сопротивление участка ВЛ длиной $L_{КЗ} / 2$; $X_{СК} = 1 / B_{СК} = 2 / (B_0^* (L_{ВЛ} - L_{КЗ}))$ – емкостное сопротивление участка ВЛ длиной $(L_{ВЛ} - L_{КЗ}) / 2$; $X_{РН}$ и $X_{РК}$ – сопротивление «фаза–земля» реакторов, включенных в начале и в конце ВЛ.

Для многократно транспонированной линии параметры схемы рис. 5 не зависят от фазы ВЛ (А,В,С), на которой произошло короткое замыкание.

Электромагнитная составляющая тока подпитки зависит от среднего вдоль трассы ВЛ тока в ее здоровых фазах. Для упрощенных расчетов допустимо считать ток в начале, в середине и в конце линии одинаковым по величине и углу. Тогда:

$$I_{ЭМ} = \frac{\Delta \dot{E}_1}{jX_S^* L_{КЗ} + (jX_{РН} \parallel (-jX_{СН}))} - \frac{\Delta \dot{E}_2}{jX_S^* (L_{ВЛ} - L_{КЗ}) + (jX_{РК} \parallel (-jX_{СК}))}, \quad (5)$$

где $\Delta \dot{E}_1$ и $\Delta \dot{E}_2$ – продольные ЭДС, наводимые в схеме рис. 5 на отключенную фазу А от токов рабочих фаз I_B и I_C :

$$\Delta \dot{E}_1 = jX_M^* L_{КЗ} \cdot (I_B + I_C) = -jX_M^* L_{КЗ} \cdot I_A,$$

$$\Delta \dot{E}_2 = jX_M^* (L_{ВЛ} - L_{КЗ}) \cdot (I_B + I_C) = -jX_M^* (L_{ВЛ} - L_{КЗ}) \cdot I_A,$$

где I_A – рабочий ток фазы А, который протекал бы в ней в отсутствие ОАПВ.

Индуктивные параметры ВЛ, входящие в (5), могут быть найдены как: $X_1^* = \omega L_1^* = \omega \cdot Z_{ВЛ} / v_1$; $X_0^* = \omega L_0^* = \omega \cdot Z_{В0} / v_0$; $X_S^* = (2X_1^* + X_0^*) / 3$; $X_M^* = (X_0^* - X_1^*) / 3$.

Рассмотрим частные случаи, где будем изменять число присоединенных к линии реакторов.

Линия без реакторов. Для линий длиной до нескольких сотен километров продольное индуктивное сопротивление заметно меньше поперечного емкостного, т.е. вместо (5) имеем:

$$I_{ЭМ} = \left[\frac{X_M^* B_0^* L_{КЗ}^2}{2} - \frac{X_M^* B_0^* (L_{ВЛ} - L_{КЗ})^2}{2} \right] \cdot I_A.$$

Наибольшая электромагнитная составляющая тока подпитки будет при КЗ в начале или в конце линии, ее величина:

$$I_{ЭМ} = \pm \frac{X_M^* B_0^* L_{ВЛ}^2}{2} \cdot I_A. \quad (6)$$

Например, для ВЛ 500 кВ типовой конструкции по формуле (6) коэффициент пропорциональности между $I_{ЭМ}$ и I_A , определяющий наибольшую возможную электромагнитную составляющую тока подпитки, приведен в табл. 4. Если по такой ВЛ 500 кВ передается достаточно большая активная мощность, скажем 1000 МВт, на напряжении 525 кВ, то амплитуда фазного тока составит 1550 А и вызовет ток подпитки, приведенный в последней строке табл. 4 (амплитудное значение).

Линия с одним реактором. Если в начале линии установлен один реактор (ШР или УШР), не отключаемый на время ОАПВ, то в (5) сопротивление $X_{РН} \parallel X_{СН}$ возрастает по сравнению со случаем без реактора, а электромагнитная составляющая тока подпитки, следовательно, снижается и будет менее значений из табл. 4. Лишь при КЗ на ВЛ вблизи от реактора ток $I_{ЭМ}$ будет достигать значений из табл. 4.

Линия с двумя реакторами. Если в обоих концах линии установлены реакторы (ШР или УШР), не отключаемые на время ОАПВ, то в (5) сопротивления $X_{РН} \parallel X_{СН}$ и $X_{РК} \parallel X_{СК}$ заметно возрастают по сравнению со случаем без реакторов, а электромагнитная составляющая тока подпитки, следовательно, снижается и будет практически отсутствовать вне зависимости от места КЗ на ВЛ.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СНИЖЕНИЮ ТОКА ПОДПИТКИ В ЦИКЛЕ ОАПВ

Согласно табл. 4 заметной величина $I_{ЭМ}$ становится только для ВЛ большой длины без реакторов при серьезной нагрузке передаваемой мощностью. Поскольку для линий большой длины все реакторы, как правило, не отключаются, то величиной $I_{ЭМ}$ в (1) допустимо пренебречь по сравнению с емкостной и другими составляющими тока подпитки, считая упрощенно $I_{СУМ} = I_{ЭС} + N_{ШР} I_{ШР} + N_{УШР} I_{УШР}$.

Время гашения дуги тока подпитки в определенной мере является случайной величиной. В [2] предложена аппроксимация зависимости времени гашения дуги (с вероятностью 0,9) от амплитуды тока подпитки $t_{г0,9} = 0,2 + 2,86 \cdot 10^{-4} \cdot I_{СУМ}^2$. Например, при амплитуде тока подпитки $I_{СУМ} = 70 \text{ А}$, используя приведенную зависимость, найдем $t_{г0,9} = 1,6 \text{ с}$. При токах большей величины, согласно [2], время гашения дуги существенно возрастает, хотя из опыта эксплуатации известны случаи, когда быстрое гашение дуги происходит и при токах, превосходящих 70 А.

Пренебрегая током $I_{ЭМ}$ и считая допустимым суммарный ток $I_{СУМ} \leq 70 \text{ А}$, рассмотрим рекомендации по проведению ОАПВ на линиях с УШР:

Отсутствие коммутаций УШР, установка 4-го луча УШР. Это применимо для линий длиной менее 200 км, но только при наличии форсировки мощности УШР; для более длинных линий кроме форсировки потребуется 4-й луч.

Размыкание треугольника обмоток УШР, установка 4-го луча УШР. Просто размыкание применимо для линий длиной менее 400–500 км; для более длинных линий требуется форсировка мощности УШР и 4-й луч.

Шунтирование треугольника обмоток УШР, установка 4-го луча УШР. Просто шунтирование применимо для линий длиной менее 400–500 км; для более длинных линий требуется 4-й луч.

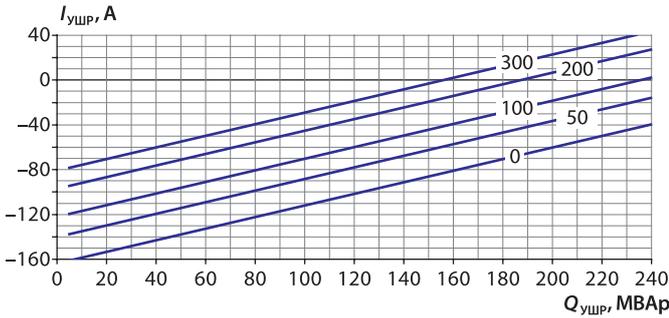
Отключение от линии фазы УШР, одноименной с поврежденной фазой ВЛ применимо для линий длиной менее 400–500 км; при этом использование 4-го луча бесполезно, поскольку здесь он не влияет на ток подпитки.

С учетом сложности реализации тех или иных технических решений можно сформулировать следующие рекомендации по проведению ОАПВ на линиях с УШР:

– для ВЛ длиной менее 400–500 км (таких линий большинство) необходимо отключать фазу УШР;

Подпитка дуги от УШР 500 кВ (расчет по (4.1)). Сопротивление 4-го луча варьируется в диапазоне от 0 до 300 Ом

Рис. 3



Подпитка дуги от УШР 500 кВ при размыкании треугольника (расчет по (4.2)). Сопротивление 4-го луча варьируется в диапазоне от 0 до 300 Ом

Рис. 4

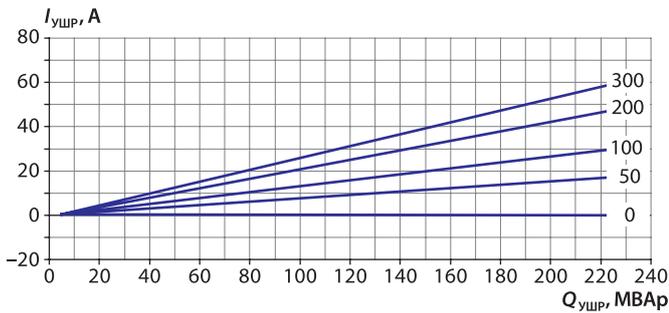
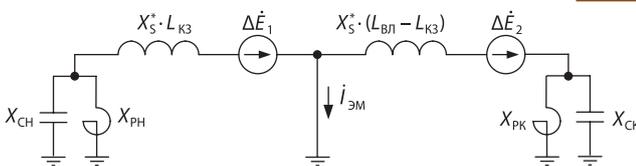


Схема замещения ВЛ в паузу ОАПВ

Рис. 5



– для ВЛ длиной более 400–500 км надо шунтировать треугольник и использовать 4-й луч.

Для ВЛ длиной более 400–500 км, когда электростатическая составляющая тока подпитки велика, установку 4-го луча можно предусматривать и/или в нейтрали УШР, и/или в нейтрали ШР. Выбор величины индуктивного сопротивления 4-го луча зависит от того, в нейтраль какого реактора он установлен.

ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕЕСЯ НАПРЯЖЕНИЕ В ЦИКЛЕ ОАПВ

Случай отключения фазы УШР

Для снижения тока подпитки на ВЛ длиной менее 400–500 км рекомендуется отключение фазы УШР.

Если на линии есть ШР (помимо УШР), то кратность установившегося повышения напряжения 50 Гц на отключенной фазе ВЛ может быть получена как:

$$\left| \frac{\dot{U}_A}{\dot{E}_A} \right| = \frac{\left(\frac{X_N^{ШР}}{X_1^{ШР} + 3X_N^{ШР}} \cdot \frac{1}{X_1^{ШР}} \right) - B_M}{\left(\frac{X_1^{ШР} + 2X_N^{ШР}}{X_1^{ШР} + 3X_N^{ШР}} \cdot \frac{1}{X_1^{ШР}} \right) - (B_0 + 2B_M)}, \quad (7)$$

где $B_M = B_M^* L_{ВЛ}$, $B_0 = B_0^* L_{ВЛ}$.

На рис. 6 для типовой ВЛ 500 кВ дана зависимость кратности напряжения 50 Гц от величины сопротивления 4-го луча, установленного в нейтрали ШР. Видно, что заметные повышения напряжения $|\dot{U}_A / \dot{E}_A| > 0,5$ возможны для линий длиной от 150 до 250 км и существенно зависят от сопротивления 4-го луча.

Если на линии нет ШР (есть только УШР), то, подставляя в (7) условие $X_1^{ШР} = \infty$, имеем всегда $|\dot{U}_A / \dot{E}_A| = B_M / (B_0 + 2B_M) \approx \approx 0,1$, т.е. напряжение минимально и не опасно.

HUEBERS
1/2

Рис. 6. Кратность напряжения 50 Гц на отключенной фазе после гашения дуги в цикле ОАПВ типовой ВЛ 500 кВ. На время ОАПВ к линии присоединен только один ШР с 4-м лучом 0–300 Ом

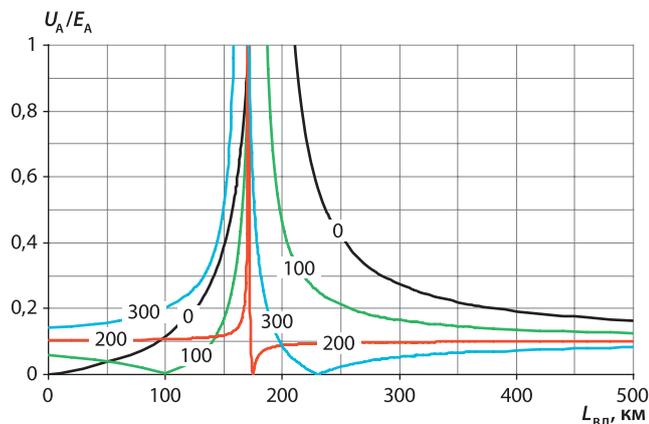
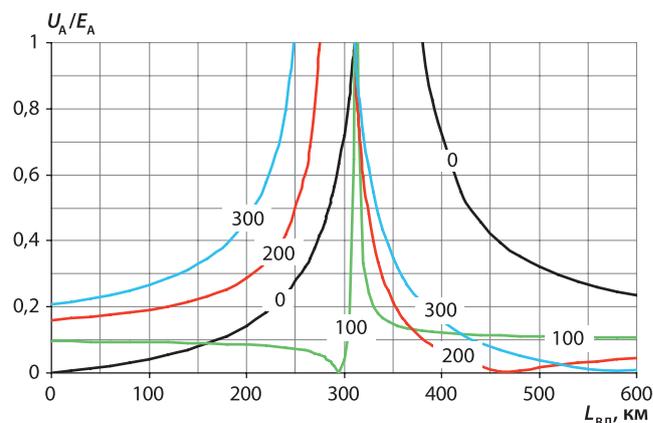


Рис. 7. Кратность напряжения 50 Гц на отключенной фазе после гашения дуги в цикле ОАПВ типовой ВЛ 500 кВ. На время ОАПВ к ВЛ присоединен только один УШР с 4-м лучом 0–300 Ом и шунтированной фазой треугольника



Случай шунтирования треугольника обмоток УШР

Для снижения тока подпитки на ВЛ длиной более 400–500 км рекомендуется шунтирование фазы (трех фаз) треугольника УШР и одновременное использование 4-го луча в нейтрали УШР.

После успешного гашения дуги тока подпитки на отключенной фазе ВЛ в биениях восстанавливается напряжение 50 Гц, кратность установившегося значения которого:

$$\left| \frac{\dot{U}_A}{\dot{E}_A} \right| = \frac{\left(\frac{X_N^{УШР}}{X_0^{УШР} + 3X_N^{УШР}} \cdot \frac{1}{X_0^{УШР}} + \frac{X_N^{ШР}}{X_1^{ШР} + 3X_N^{ШР}} \cdot \frac{1}{X_1^{ШР}} \right) \cdot B_M}{\left(\frac{X_0^{УШР} + 2X_N^{УШР}}{X_0^{УШР} + 3X_N^{УШР}} \cdot \frac{1}{X_0^{УШР}} + \frac{X_1^{ШР} + 2X_N^{ШР}}{X_1^{ШР} + 3X_N^{ШР}} \cdot \frac{1}{X_1^{ШР}} \right) \cdot (B_0 + 2B_M)} \quad (8)$$

Если на линии есть ШР (помимо УШР), то в зависимости от мощности ШР и УШР, мест установки 4-х лучей (в нейтрали ШР и/или в нейтрали УШР) для каждой конкретной ВЛ заданной длины и конструкции следует проводить расчеты по (8).

Если на линии нет ШР (есть только УШР), то, подставляя в (8) условие $X_1^{ШР} = \infty$, имеем кратность напряжения 50 Гц на отключенной фазе, приведенную на рис. 7.

Рекомендации по восстанавливаемому напряжению в цикле ОАПВ

С целью недопущения резонансных перенапряжений на отключенной фазе после гашения дуги подпитки (а также для снижения вероятности повторных пробоев дугового промежутка) следует стремиться к минимизации величины восстанавливаемого напряжения. Приемлемым (с некоторым запасом) можно считать напряжение $|\dot{U}_A / \dot{E}_A| < 0,5$.

Понимая возможные погрешности в задании величин, входящих в (7) и (8), целесообразно провести расчеты не только для конкретной длины ВЛ, но и при длинах, близких к заданной,

так как резонансные повышения напряжения иногда бывают в очень узком диапазоне параметров схемы (см. рис. 6 при $X_N^{УШР} = 200$ Ом, рис. 7 при $X_N^{УШР} = 100$ Ом).

Для линий с несколькими реакторами в расчетах важно рассмотреть не только ситуацию, когда к моменту запуска ОАПВ в работе находились все реакторы, но и вариант, когда к моменту запуска ОАПВ один из реакторов был отключен.

Если восстанавливаемое напряжение в каком-то из рассмотренных случаев окажется неприемлемым, то можно:

- скорректировать место установки 4-го луча и его параметры, сохранив при этом ток подпитки на допустимом уровне;
- для линий «пограничной» длины (400–500 км для ВЛ 500 кВ) изменить способ снижения тока подпитки, сохранив при этом ток подпитки на допустимом уровне (вместо шунтирования треугольника обмоток УШР использовать отключение фазы УШР или наоборот);
- использовать возможность отключения фазы ШР, одноименной с поврежденной фазой ВЛ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Евдокунин Г.А. Электрические системы и сети. СПб.: Издательство Сизова М.П., 2004.
2. Беляков Н.Н., Кадомская К.П. и др. Процессы при однофазном повторном включении линий высоких напряжений / под ред. М.Л. Левинштейна. М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Кондратенко Д.В., Долгополов А.Г. Опыт эксплуатации управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов производства ОАО «Запорожтрансформатор» в Литве и Казахстане // Энерго-Info. 2009. № 10(33).
4. Евдокунин Г.А., Дмитриев М.В., Карпов А.С., Николаев Р.Н., Шескин Е.Б. Компьютерное моделирование управляемых шунтирующих реакторов различных типов и сравнение их технических характеристик // Энергетик. 2011. № 3.

ВАКУУМНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

Новое имя на рынке коммутационных аппаратов

ВБ/ТЭК-2-10

Номинальное напряжение	10 кВ
Номинальный ток	630–3150 А
Номинальный ток отключения	20; 25; 31,5 кА
Коммутационный ресурс	25000 циклов В–0



Аттестован ФСК и МРСК.

Исполнения:

- стационарное;
- на выкатном элементе («евро»-выкатной; к ячейкам К-104, К-59, КРУ2-10, К-12, К-26, К-27, К-Вл и др.).

Комплекты для ретрофита КСО, КРН, ЗРУ.

Всегда в наличии.

Цена: от 95000 руб. с НДС

МАЛОГАБАРИТНЫЕ ЯЧЕЙКИ

Лучшие цены на рынке, кратчайшие сроки поставки

Камеры КСО-310

Номинальное напряжение	10 кВ
Номинальный ток	630, 1250 А
Ток термической стойкости	20 кА
Габариты (Ш×Г×В)	800×900×2150 мм



Коммутационные аппараты:

- вакуумный выключатель ВБ/ТЭК-3-10;
- вакуумный выключатель нагрузки ВН/ТЭК-10.

Идеальны для комплектации РТП; ТП и РП (кирпич, «сэндвич», бетон).

Цена с ВВ и блоком МПЗ: от 275000 руб. с НДС

