



Михаил Дмитриев,
к.т.н., главный специалист
производственно-
технического отдела
ПЦ «Севзапэнергопроект»
ОАО «СевЗанНТЦ»,
г. Санкт-Петербург

В настоящее время в сетях имеется определенное число воздушных линий (ВЛ) 500–750 кВ, у которых зарядная мощность почти на 100% скомпенсирована при помощи линейных шунтирующих реакторов (ШР), присоединенных к ВЛ.

По мнению Михаила Викторовича Дмитриева это приводит к ряду серьезных проблем, которых можно было бы избежать, если бы линейные ШР обеспечивали компенсацию не более 60–70% зарядной мощности, а остальные ШР размещались на шинах распределительных устройств.

ТРЕБОВАНИЯ К КОМПЕНСАЦИИ ЗАРЯДНОЙ МОЩНОСТИ ЛИНИЙ 500–750 кВ

В п. 5.37 Методических рекомендаций [1] указано, что «Мощность, число и размещение шунтирующих реакторов уточняется при проектировании конкретных линий электропередачи. При отсутствии данных степень компенсации зарядной мощности линий следует принимать не менее 80–100% – на 500 кВ, 100–110% – на ВЛ 750 кВ...». Как видно, в [1] компенсация на 100% рекомендуется в качестве отправной точки, но оптимальные места установки реакторов – на сборные шины или непосредственно на линию – должны быть уточнены по результатам расчетов режимов сети. Складывается впечатление, что сеть лучше проектировать именно со 100% компенсацией зарядной мощности линии индуктивностью линейных ШР.

В [2, 3] показано, что ВЛ с близкой к 100% компенсацией зарядной мощности обладают существенными недостатками:

- возможность повреждения выключателей ВЛ аperiodическими токами;
- возможность резонансных перенапряжений на отключенной от сети фазе ВЛ в неполнофазных режимах (при ОАПВ и др.). В [2] для ограничения аperiodических токов предлагается:
- оснащение выключателей ВЛ устройствами управляемой коммутации (УК), которые настроены на включение ВЛ вблизи от максимума сетевого напряжения;
- оснащение выключателей ВЛ предвключаемыми резисторами (ПР);
- отказ от коммутации ВЛ с опасным числом присоединенных к ней ШР.

В [3] для ограничения перенапряжений предлагается:

- заземление нейтрали ШР через «нейтральный» реактор;
- отказ от коммутации ВЛ с опасным числом присоединенных к ней ШР.

Оснащение электропередач резисторами, блоками управляемой коммутации, «нейтральными» реакторами увеличивает их стоимость, усложняет эксплуатацию. Однако хуже другое: названное оборудование попросту неэффективно, если оно применяется на линиях с близкой к 80–120% компенсацией зарядной мощности (таких линий в России достаточно много, и их число растет). Отказ от коммутаций ВЛ с опасным числом ШР, как будет показано ниже, также не является панацеей.

Решением проблемы могла бы быть смена технической политики по размещению ШР в сетях 500–750 кВ. Там, где это не вызовет опасного для оборудования повышения напряжения 50 Гц в режимах одностороннего питания ВЛ, реакторы следует выносить с линии на сборные шины концевых распределительных устройств.

Иными словами, не стоит стремиться к 100% компенсации зарядной мощности ВЛ индуктивностью линейных ШР, а следует прибегать к компенсации, скажем, не более чем на 60–70%. Например, именно такая степень указана на стр. 203 известного справочника [4]: «...для обеспечения приемлемых напряжений в режимах малых нагрузок в сетях 110–220 кВ энергосистем, примыкающих к подстанциям дальней электропередачи, и вдоль самой электропередачи необходима установка шунтирующих реакторов, компенсирующих 60–80% зарядной мощности линии 330–750 кВ...».

Рассмотрим эти вопросы подробнее.

КОМПЕНСАЦИЯ ЗАРЯДНОЙ МОЩНОСТИ ЛИНИИ

Для линий электропередачи, оснащенных ШР (рис. 1), важной характеристикой является коэффициент компенсации зарядной мощности линии:

$$K = b_{p\phi} / b_1, \quad (1)$$

где b_1 – емкостная проводимость линии по прямой последовательности;

$b_{p\phi} = 1 / X_{p\phi}$ – индуктивная проводимость N реакторов линии, $X_{p\phi} = X_p / N$ – эквивалентное индуктивное сопротивление реакторов, $X_p = U_{\text{НР}}^2 / Q_p$ – индуктивное сопротивление одного реактора, определенное через его трехфазную мощность Q_p и наибольшее рабочее напряжение сети $U_{\text{НР}}$ (525, 787 кВ).

Для ВЛ 500–750 кВ типовой конструкции зависимости K от длины линии, числа и мощности реакторов приведены на рис. 2. Например, 100% компенсация зарядной мощности ($K = 1$) для линий с одним реактором достигается:

- для ВЛ 500 кВ с реактором 180 МВАр при длине 175 км;
- для ВЛ 750 кВ с реактором 330 МВАр при длине 130 км.

УПРАВЛЯЕМАЯ КОММУТАЦИЯ И РЕЗИСТОРЫ

Выключатели с управляемой коммутацией

Эффективность оснащения выключателя ВЛ устройствами управляемой коммутации существенно зависит от точности их работы. Для решения проблемы аperiodических токов коммутация ВЛ (смыкание контактов выключателя или же пробой промежутка между сходящимися контактами) должна происходить в момент времени, близкий к максимальному значению сетевого напряжения. Возможное отклонение момента коммутации от максимума напряжения является главной причиной, по которой область применения УК ограничена.

В [2] были получены приведенные ниже выражения, описывающие диапазон коэффициентов компенсации ВЛ, при которых может применяться УК (рис. 3):

$$\begin{cases} 0 \leq K \leq \frac{1}{1 + 0,95 \cdot \sin \Delta \Psi} \\ \frac{1}{1 - 0,95 \cdot \sin \Delta \Psi} \leq K < \infty \end{cases}, \quad (2)$$

где коэффициент 0,95 учитывает затухание аperiodического тока.

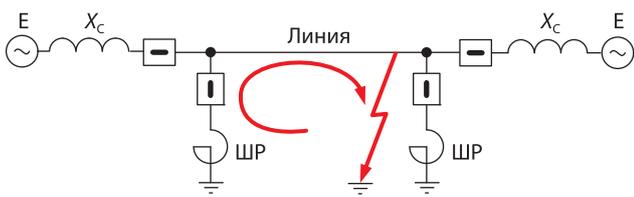
Опираясь на типовую точность $\Delta \Psi = 2$ мс предлагаемых сейчас на рынке УК, согласно рис. 3 получаем, что в широком диапазоне коэффициентов $0,65 < K < 2,25$ применение УК неэффективно.

Иными словами, на линиях 500–750 кВ с близкой к 100% компенсацией зарядной мощности выключатели с устройствами управляемой коммутации не смогут снять проблему аperiodических токов.

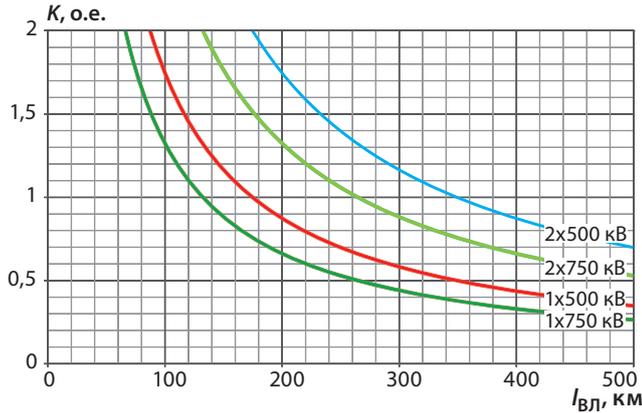
Выключатели с предвключаемыми резисторами

Некоторые специалисты предлагают оснащать линейные выключатели предвключаемыми резисторами. При этом сопротивление резистора должно быть таким, чтобы за время ▶

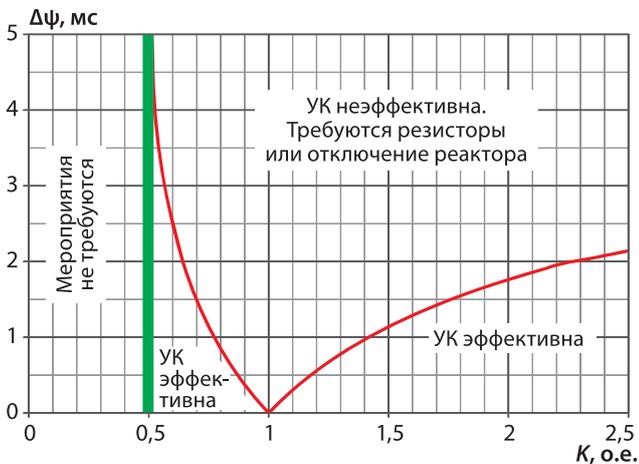
• Рис. 1. Схема электропередачи с линейными реакторами



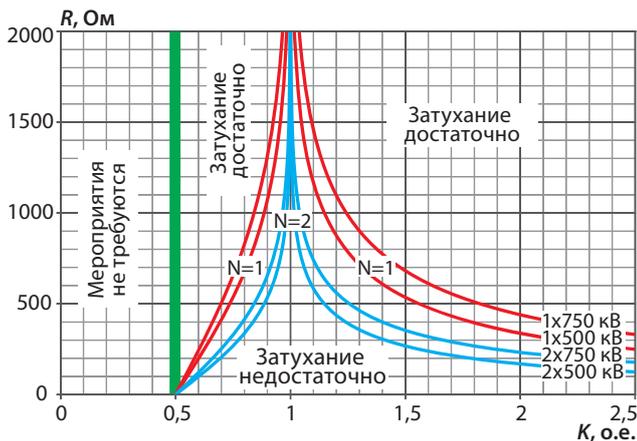
• Рис. 2. Коэффициент компенсации в зависимости от длины ВЛ 500 и 750 кВ типовой конструкции и общего числа (один, два) присоединенных ШР 500 кВ (180 МВАр) и 750 кВ (330 МВАр)



• Рис. 3. Требования к точности управляемой коммутации в зависимости от коэффициента компенсации зарядной мощности ВЛ 500–750 кВ



• Рис. 4. Требования к величине сопротивления предвключаемого резистора в зависимости от коэффициента компенсации зарядной мощности ВЛ 500–750 кВ



его работы $\Delta T_R = 0,01$ сек аperiodическая составляющая затухла [2].

Постоянная времени цепи «резистор–реакторы» может быть найдена как $\tau_R = L_{P3} / R$, где $L_{P3} = X_{P3} / \omega$ – эквивалентная индуктивность всех N реакторов ВЛ.

Для выбора сопротивления резистора можно воспользоваться формулами (2), куда надо подставить:

- коэффициент затухания $\exp(-\Delta T_R / \tau_R)$ вместо 0,95;
- ошибку $\Delta \psi = 5$ мс, которая, по сути, отвечает случаю отсутствия устройств УК, т.е. $\sin \Delta \psi = 1$:

$$\begin{cases} 0 \leq K \leq \frac{1}{1 + \exp(-\Delta T_R / \tau_R)} \\ \frac{1}{1 - \exp(-\Delta T_R / \tau_R)} \leq K < \infty \end{cases} \quad (3)$$

Указанные условия могут быть использованы для построения зависимости $R = f(K)$ требуемого сопротивления резистора от коэффициента компенсации зарядной мощности линии (рис. 4). Для ВЛ 500 кВ и ВЛ 750 кВ зависимости мало отличаются друг от друга в силу близости индуктивных сопротивлений типовых реакторов 500 кВ (180 МВАр, 1531 Ом) и 750 кВ (330 МВАр, 1877 Ом).

В области коэффициентов компенсации $K \approx 1$ с помощью рис. 4 определить конкретное значение сопротивления резистора неудобно. В таких случаях его следует искать иначе: полное затухание аperiodической составляющей происходит за время $3\tau_R$ и должно быть не более времени нахождения его в работе ΔT_R (см. [2]).

При работе выключателей, оснащенных резисторами, аperiodический ток может возникать дважды: при подаче напряжения на линию через резистор и при шунтировании резистора. Обе составляющие могут быть опасны для элегазового выключателя, если вслед за включением ему придется выполнять коммутацию отключения.

Если резистор имеет сопротивление более 500 Ом, то его шунтирование, как правило, вызывает интенсивный переходный процесс и появление новой аperiodической составляющей. Иными словами, резисторы сопротивлением более 500 Ом бессмысленны для борьбы с токами.

С помощью рис. 4, опираясь на предельную цифру 500 Ом, можно получить следующие границы неэффективной работы выключателей 500(750) кВ с резисторами:

- для линий с одним реактором $0,75(0,7) < K < 1,55(1,8)$;
- для линий с двумя реакторами $0,9(0,85) < K < 1,15(1,25)$.

Видно, что на линиях 500–750 кВ с близкой к 100% компенсацией зарядной мощности выключатели с предвключаемыми резисторами не смогут снять проблему аperiodических токов.

«НЕЙТРАЛЬНЫЕ» РЕАКТОРЫ

Для ограничения резонансных перенапряжений в неполнофазных режимах ВЛ (например при ОАПВ) можно использовать реакторы, установленные в нейтрали ШР [3, 5]. Однако основным назначением таких реакторов всегда была не борьба с перенапряжениями, а снижение тока подпитки в паузу ОАПВ, от величины которого зависит гашение дуги и успешность ОАПВ.

Как показал опыт, «нейтральные» реакторы по ряду причин в сетях так и не прижились: их консервировали или вовсе демонтировали даже на тех ВЛ, где они были предусмотрены для выполнения своего основного назначения – компенсации электростатической составляющей тока подпитки в паузу ОАПВ.

На основе формул из [3] можно получить кратность повышения напряжения U на отключенной фазе ВЛ (относительно фазного значения напряжения сети E), которая установится при ОАПВ после гашения дуги тока подпитки:

$$K_U = \left| \frac{U}{E} \right| = \left| \frac{X_N}{X_P + 3X_N} - \frac{1}{nK} \right|, \quad (4)$$

где X_N – индуктивное сопротивление реакторов, которые установлены в нейтрали линейных шунтирующих реакторов ($X_N = 0$ – отсутствие нейтрального реактора);

$n = b_1 / b_M$ и $m = b_1 / (b_1 - b_M)$ – коэффициенты, которые зависят от конструкции ВЛ;

b_1 и b_M – емкостная проводимость линии по прямой последовательности и межфазная.

На рис. 5 представлены расчеты кратности по формуле (4), где для ВЛ 500–750 кВ принято $n \approx 11,5$ и $m \approx 1,1$.

Из рис. 5 следует, что для ВЛ 500–750 кВ с близкой к 100% компенсацией и реактором в нейтрали ШПР установившееся значение напряжения при ОАПВ будет выше 0,5 напряжения сети, что уже может вызвать повторные пробой в месте, где погасла дуга подпитки, т.е. снижает вероятность успешного ОАПВ.

На самом деле после гашения дуги тока подпитки восстановление напряжения происходит в биениях [5] и его максимальное значение в переходном процессе оказывается заметно выше установившегося, которое приведено на рис. 5. Такое напряжение способно не только вызвать повторные пробой в месте, где погасла дуга, но и повредить оборудование линии (если повторные пробой не возникли). Иными словами, нейтральные реакторы были бы неэффективны, если бы их использовали для ограничения резонансных перенапряжений в неполнофазных режимах ВЛ с близкой к 100% компенсацией реактивной мощности.

ОТКЛЮЧЕНИЕ ЛИНЕЙНОГО РЕАКТОРА

Управляемая коммутация и предвключаемые резисторы неэффективны для ВЛ с компенсацией на 80–120%. Кроме того, они не решают проблемы перенапряжений в неполнофазных режимах. Единственным универсальным для всех ВЛ решением по борьбе с токами, и с перенапряжениями является, на первый взгляд, отказ от коммутаций ВЛ с опасным числом реакторов. Однако коммутация ВЛ 500–750 кВ с предварительно отключенным реактором имеет ряд особенностей и недостатков.

Во-первых, коммутация ВЛ 500–750 кВ с предварительно отключенным ШПР отчасти лишает смысла его установку на ВЛ, ведь основным назначением линейного ШПР является ограничение на ВЛ повышенного напряжения промышленной частоты (и помощь ОПН в ограничении коммутационных перенапряжений). Кроме того, частые коммутации реакторов (гораздо чаще, чем это требуется по режимным условиям) уменьшают ресурс реакторных выключателей и нежелательны для изоляции ШПР.

Во-вторых, в ряде случаев существует риск повреждения выключателей ШПР аperiodическими токами. Приведем пример.

Пусть в схеме рис. 1 имел место нормальный режим работы, но на линии возникло однофазное КЗ. Если КЗ возникло вблизи от нулевого значения синусоиды сетевого напряжения, то в токе КЗ ВЛ (рис. 6а) и в токе реактора (рис. 6б) появляется аperiodическая составляющая. При этом периодическая составляющая тока в выключателе ВЛ, протекающая под действием напряжения сети, имеется (рис. 6а), тогда как в токе выключателя фазы ШПР, одноименной с поврежденной фазой линии, она отсутствует (рис. 6б). Причем отсутствует вне зависимости от длины ВЛ и коэффициента компенсации К, поскольку фаза реактора оказалась шунтирована местом КЗ (напряжение сети и емкость линии уже не влияют на ток реактора).

Возникшее однофазное КЗ приведет к запуску цикла ОАПВ, выключатели по концам ВЛ отключат аварийную фазу. Однако если для этой ВЛ проектом предусмотрено отключение ШПР на время ОАПВ, то у выключателя ШПР возникнут сложности, поскольку в нем проходит аperiodический ток, который замыкается по контуру «линия – место КЗ – земля – ШПР» (см. рис. 1), а периодическая составляющая тока полностью отсутствует (рис. 6б). С высокой вероятностью выключатель ШПР будет поврежден по аналогии с выключателями по концам ВЛ [2].

Перенос линейных реакторов на шины

Если реакторы, установленные на ВЛ и обеспечивающие близкую к 100% компенсацию, вызывают столь серьезные проблемы, единственным универсальным решением которых является отключение одного реактора на время коммутации ВЛ (да еще и с риском повреждения реакторного выключателя), то возникает вопрос: так ли необходимо стремиться к 100% компенсации зарядной мощности ВЛ линейными реакторами или же часть этих реакторов целесообразно присоединить не к линии, а к сборным шинам распределительных устройств?

В сетях 500–750 кВ основным назначением ШПР является:

- обеспечение приемлемых напряжений в режимах малых нагрузок (например, ограничение напряжения 50 Гц в конце односторонне питаемых ВЛ от сети);
- обеспечение баланса реактивной мощности.

Размещение реакторов на линии (вместо шин) необходимо прежде всего для обеспечения приемлемого уровня напряжения на ВЛ в режимах ее одностороннего питания [1, 6].

Если это напряжение не представляет опасности для оборудования (например в силу малой длины ВЛ), то главным назначением реакторов становится баланс реактивной мощности, а для выполнения таких функций годятся любые ШПР – и линейные, и шинные. Однако, как было показано, присоединение реакторов к шинам распределительных устройств является предпочтительным, поскольку это снижает степень компенсации зарядной мощности ВЛ индуктивностью линейных реакторов, избавит ВЛ от проблем с аperiodическими токами и перенапряжениями в неполнофазных режимах.

Согласно п. 5.37 Рекомендаций [1] выбор мест установки реакторов должен быть основан на расчетах режимов напряжения. С целью определения возможности размещения реакторов на линии 500–750 кВ, а на шинах, выполним расчеты напряжения промышленной частоты в самом неблагоприятном случае – при ее одностороннем питании от сети малой мощности.

РАСЧЕТ НАПЯЖЕНИЯ НА ВЛ ПРИ ЕЕ ОДНОСТОРОННЕМ ПИТАНИИ

Расчетным для проверки воздействий на оборудование и принятым решением о необходимости установки реактора на конце ВЛ является случай одностороннего питания ВЛ от сети (на время синхронизации).

Кратность повышения напряжения в конце односторонне питаемой ВЛ может быть определена [6] как:

$$K_U = \left| \frac{U}{E} \right| = \left| \frac{\sin(\alpha_p) \cdot \cos(\alpha_c)}{\sin(\lambda + \alpha_p + \alpha_c)} \right|, \quad (5)$$

где E – фазное значение напряжения сети;

$\lambda = 1,047 \cdot 10^{-3} \cdot l_{ВЛ} \cdot I_{ВЛ}$ – волновая длина ВЛ по прямой последовательности (в радианах);

$l_{ВЛ}$ – длина линии (км);

$Z_{ВЛ}$ – волновое сопротивление линии по прямой последовательности (может быть принято 280 Ом для 500 кВ, 260 Ом для 750 кВ), используемое для определения углов (в радианах):

$$\alpha_c = \arctg(X_C / Z_{ВЛ}); \quad \alpha_p = \arctg(X_{PK} / Z_{ВЛ}),$$

где X_C – эквивалентное индуктивное сопротивление системы (на 50 Гц) по прямой последовательности;

$X_{PK} = X_p / N_K$ – эквивалентное индуктивное сопротивление (на 50 Гц) всех N_K шунтирующих реакторов, присоединенных в конце ВЛ.

Наибольшие перенапряжения в (5) получаются при повышенном индуктивном сопротивлении системы X_C , т.е. для питающей сети малой мощности. На рис. 7 даны результаты расчетов по (5) при сопротивлении системы 50 Ом. Такие расчеты позволяют сделать незаниженные оценки повышенного напряжения, поскольку для сетей 500–750 кВ обычно $X_C < 50$ Ом.

Допустимое повышение напряжения промышленной частоты оборудования в зависимости от длительности воздействия указывается в ПТЭ [7] – см. табл. 1. Даже если бы время одностороннего питания ВЛ составляло 20 мин, то допустимым для всего оборудования, присоединенного к линии в ее конце, было бы напряжение с кратностью 1,10. Опираясь на такую кратность, с помощью рис. 7 получаем, что для ВЛ 500–750 кВ длиной до 250–300 км установка реактора на линии не требуется!

Режим одностороннего питания ВЛ 500–750 кВ возникает прежде всего на время синхронизации, которое при использовании современных автоматических синхронизаторов не превосходит десятков секунд. При таком времени допустимая кратность составит не менее 1,20–1,30. При допустимой кратности 1,20 установка реакторов на линии не требуется при длинах до 400 км (см. рис.7). Для линий длиной более 400 км уже требуется наличие 1–2 реакторов, но лишь на разомкнутом конце ВЛ (рядом с выключателем, на котором выполняется синхронизация).

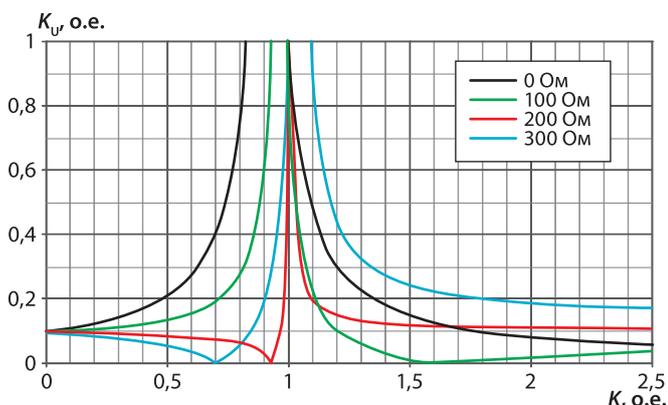
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сложилась практика, по которой на многих ВЛ 500–750 кВ имеется высокая, близкая к 100%, компенсация зарядной мощности индуктивностью линейных ШПР. Это приводит к появлению:
 - опасных для выключателей ВЛ аperiodических токов;

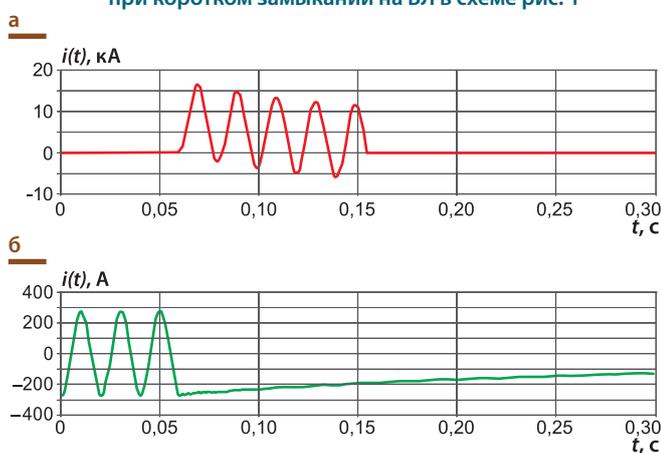
► • **Таблица 1. Допустимое повышение напряжения промышленной частоты оборудования 500–750 кВ согласно ПТЭ [7]**

Оборудование	Номинальное напряжение, кВ	Допустимое повышение при длительности воздействия			
		20 мин	20 с	1 с	0,1 с
Шунтирующие реакторы и электромагнитные трансформаторы напряжения	500	1,15	1,35	2	2,08
	750	1,10	1,30	1,88	1,98
Коммутационные аппараты, емкостные трансформаторы напряжения, трансформаторы тока, конденсаторы связи	500	1,15	1,60	2,20	2,40
	750	1,10	1,30	1,88	1,98
ОПН	500, 750	1,26	1,35	1,52	–

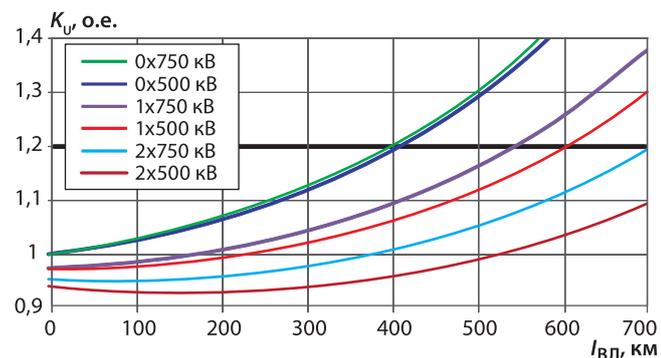
• **Рис. 5. Кратность установившегося повышения напряжения 50 Гц на отключенной фазе ВЛ 500 кВ в бестоковую паузу ОАПВ в зависимости от индуктивного сопротивления нейтрального реактора (на ВЛ 750 кВ аналогично)**



• **Рис. 6. Ток фазы выключателя ВЛ (а) и фазы реактора (б) при коротком замыкании на ВЛ в схеме рис. 1**



• **Рис. 7. Повышение напряжения в конце ВЛ 500–750 кВ типовой конструкции в зависимости от числа (ноль, один, два) присоединенных в ее конце ШР 500 кВ (180 МВАр) и 750 кВ (330 МВАр)**



- опасных для всего оборудования ВЛ резонансных перенапряжений при неполнофазных режимах питания (например при ОАПВ).
- 2. Для ограничения аperiodических токов можно оснащать выключатели ВЛ 500–750 кВ блоками управляемой коммутации или предвключаемыми резисторами. Приобретение и эксплуатация такого оборудования обременительны. При этом такие устройства влияют только на аperiodические токи и в принципе не способны ограничить перенапряжения в неполнофазных режимах, а для линий с компенсацией около 80–120% они неэффективны даже для борьбы с токами.
- 3. Для ограничения резонансных перенапряжений в неполнофазных режимах в нейтраль линейных ШР можно устанавливать «нейтральные» реакторы, но такое решение по ряду причин не применяется. При этом для линий с компенсацией около 80–120% оно и вовсе неэффективно.
- 4. Единственным мероприятием, позволяющим даже для самых неблагоприятных линий с 80–120% компенсацией ограничить до безопасных значений и токи, и напряжения, является отключение перед коммутациями ВЛ 500–750 кВ какого-либо из линейных реакторов ВЛ. Такое решение является «бесплатным», но имеет ряд недостатков, главный из которых – риск повреждения выключателя ШР аperiodическими токами, возникающими при коротком замыкании на ВЛ.
- 5. Основной причиной размещения реакторов на линии, а не на шинах, является необходимость ограничения повышения напряжения в конце ВЛ в режиме ее одностороннего питания. Согласно расчетам для ВЛ 500–750 кВ без линейных реакторов, как правило, повышение напряжения еще приемлемо даже при длине ВЛ до 400 км. Линейные реакторы нужны прежде всего для более длинных ВЛ.
- 6. Перечисленные соображения говорят в пользу того, чтобы по мере возможности отказываться от высокой (80–120%) степени компенсации зарядной мощности ВЛ 500–750 кВ линейными реакторами. Число линейных реакторов следует выбрать на компенсацию не более 60–70% зарядной мощности ВЛ (остальную мощность компенсировать шинными реакторами). При компенсации не более 50% зарядной мощности ВЛ никаких проблем с аperiodическими токами и перенапряжениями в неполнофазных режимах уже не существует.

ЛИТЕРАТУРА

1. СО 153-34.20.118-2003. Методические рекомендации по проектированию развития энергосистем, Москва, 2003.
2. Дмитриев М.В. Методика выбора мероприятий по борьбе с аperiodическими токами ВЛ 500–750 кВ // Новости ЭлектроТехники. 2012. № 4(77).
3. Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А., Долгополов А.Г., Кондратенко Д.В., Шескин Е.Б. Однофазное автоматическое повторное включение на линиях с управляемым шунтирующим реактором // Энергетик. 2012. № 4.
4. Справочник по проектированию электроэнергетических систем/ под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. – 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1985.
5. Беляков Н.Н., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л. и др. Процессы при однофазном повторном включении линий высоких напряжений / под ред. М.Л. Левинштейна. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
6. Евдокунин Г.А. Электрические системы и сети. СПб.: Издательство ООО «Синтез Бук», 2011.
7. Правила технической эксплуатации электростанций и сетей РФ. М.: Изд-во «Энергосервис», 2003.