



Требования к компенсации зарядной мощности линий электропередачи 500 – 750 кВ

ДМИТРИЕВ М. В., канд. техн. наук, СПбГПУ
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29
mvd@mva.ru

В настоящее время в электрических сетях присутствует некоторое число воздушных линий (ВЛ) электропередачи 500 – 750 кВ, в которых зарядная мощность скомпенсирована почти на 100 % с помощью линейных шунтирующих реакторов (ШР), присоединённых к ВЛ. Основные проблемы линий с близкой к 100 % компенсацией — отключение из-за наличия в коммутируемом токе линии апериодической составляющей и резонансные перенапряжения в различных неполнофазных режимах её работы, например, при однофазном автоматическом повторном включении (ОАПВ) и пр. Этого можно избежать, если выбирать линейные ШР на обеспечение компенсации не более 60 – 70 % зарядной мощности ВЛ, а остальные ШР размещать на шинах распределительных устройств.

Ключевые слова: линия электропередачи, воздушная линия, шунтирующий реактор, элегазовый выключатель, реактивная мощность, компенсация зарядной мощности линии, апериодическая составляющая тока, перенапряжения, ОАПВ.

В Методических рекомендациях (п. 5.37) [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 ВЛ 500 кВ, 100 – 110 % — на ВЛ 750 кВ...». В [1] компенсация на 100 % рекомендуется в качестве отправной точки, но оптимальные места установки реакторов (на сборные шины или непосредственно на линию) должны уточняться по результатам расчётов режимов сети. Однако, ознакомившись с п. 5.37 [1], возникает убеждение, что электросеть лучше проектировать именно со 100 %-ной компенсацией зарядной мощности линии индуктивностью линейных ШР.

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

- повреждения выключателей ВЛ апериодическими токами;
- резонансных перенапряжений на отключённой от сети фазе ВЛ в неполнофазных режимах, например, при ОАПВ.

В [2] для ограничения апериодических токов предлагаются на выбор следующие решения.

1. Оснащение выключателей ВЛ устройствами управляемой коммутации (УК), которые настроены на включение ВЛ вблизи максимума сетевого напряжения.

2. Обеспечение выключателей ВЛ предвключаемыми резисторами (ПР).

3. Отказ от коммутации ВЛ с опасным числом присоединённых к ней ШР.

В [3] для ограничения резонансных перенапряжений предлагаются на выбор два варианта: заземление нейтрали ШР через «нейтральный» реактор и отказ от коммутации ВЛ с опасным числом присоединённых к ней ШР. Оснащение линий электропередачи резисторами, блоками УК, «нейтральными» реакторами увеличивает их стоимость и усложняет эксплуатацию. Однако хуже другое — указанное оборудование попросту неэффективно, если оно применяется на линиях с близкой к 80 – 120 % компенсацией зарядной мощности. Таких линий в России довольно много, и их число растёт.

Отказ от коммутации ВЛ с опасным числом ШР, как будет показано далее, также не является панацеей. Решением проблемы могла быть смена технической политики по размещению ШР в

электросетях 500 – 750 кВ. В тех линиях, где это не вызовет опасного для оборудования повышения напряжения частотой 50 Гц в режимах одностороннего питания ВЛ, реакторы следует выносить с линии на сборные шины конечных распределительных устройств (РУ).

Таким образом, не стоит стремиться к 100 %-ной компенсации зарядной мощности ВЛ индуктивностью линейных реакторов, а следует прибегать к компенсации, например, не более чем на 60 – 70 %. Именно такая степень указана в справочнике [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...».

Компенсация зарядной мощности линии электропередачи

Важная характеристика ВЛ, оснащённых ШР (рис. 1), — коэффициент компенсации её зарядной мощности

$$K = b_{p,з}/b_{1,} \quad (1)$$

где b_1 — ёмкостная проводимость линии по прямой последовательности; $b_{p,з} = 1/X_{p,з}$ — индуктивная проводимость всех реакторов линии; $X_{p,з} = X_p/N$ — эквивалентное индуктивное сопротивление реакторов [$X_p = U_{н,р}^2/Q_p$ — индуктивное сопротивление одного реактора, определённое через его трёхфазную мощность Q_p и наибольшее рабочее напряжение сети $U_{н,р}$ (525,787 кВ), N — общее число реакторов на ВЛ)].

Для ВЛ 500 – 750 кВ типовой конструкции зависимости коэффициента K от длины линии l , числа и мощности реакторов приведены на рис. 2. Например, 100 %-ная компенсация зарядной мощности ($K = 1$) в линиях с одним реактором достигается при $l = 175$ км (для ВЛ 500 кВ с реактором 180 Мвар) и $l = 130$ км (для ВЛ 750 кВ с реактором 330 Мвар).

Управляемая коммутация и резисторы

Компьютерное моделирование позволяет проводить расчёты переходных процессов включения каждой конкретной ВЛ с учетом её особенностей, числа и мест установки реакторов, параметров примыкающих к линии систем. Однако, чтобы сформулировать обобщающие выводы, расчёты токов (а затем и напряжений) будем проводить аналитически, приняв ряд допущений, позволивших получить простые и легко проверяемые формулы.

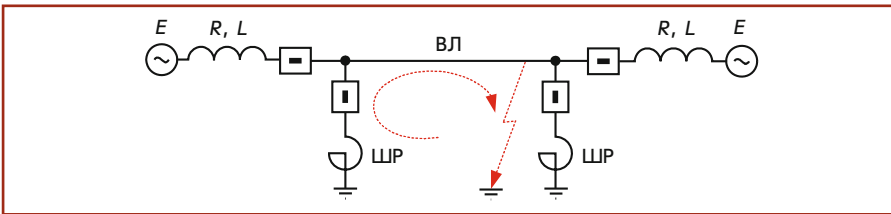


Рис. 1. Схема электропередачи с линейными реакторами

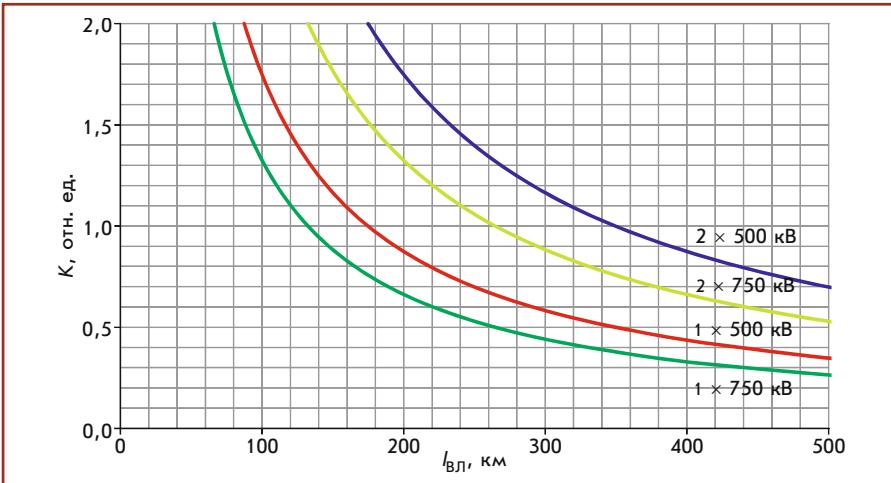


Рис. 2. Зависимость коэффициента компенсации от длины ВЛ 500 и 750 кВ типовой конструкции и общего числа (один, два) присоединённых ШПР 500 кВ (180 Мвар) и 750 кВ (330 Мвар)

Выключатели с УК. Эффективность оснащения выключателя ВЛ устройствами УК 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. Возможность отклонения момента коммутации от максимума $\Delta\psi$ напряжения — главная причина ограничения области применения УК.

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

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

где 0,95 — коэффициент, учитывающий затухание аperiodического тока.

При типовой точности $\Delta\psi = 1$ мс предлагаемых сейчас на рынке УК в широком диапазоне коэффициентов $0,8 < K < 1,4$ (см. рис. 3) их применение неэффективно. Таким образом, на ВЛ 500 – 750 кВ с близкой к 100 % компенсацией зарядной мощности выключатели с устройствами УК не смогут снять проблему аperiodических токов.

Выключатели с ПР. В настоящее время некоторые специалисты предлагают оснащать линейные выключатели

ПР для борьбы с аperiodической составляющей тока. При этом сопротивление резистора должно быть таким, чтобы за время его работы $\Delta T_R = 0,01$ с аperiodическая составляющая полностью затухала [2]. Постоянная времени цепи «резистор – реакторы» определяется следующим образом:

$$\tau_R = L_{p.э} / R,$$

где $L_{p.э} = X_{p.э} / \omega$ — эквивалентная индуктивность всех реакторов ВЛ ($\omega = 314$ рад/с — круговая частота).

Для выбора сопротивления резистора в формулы (2) подставим вместо

коэффициента 0,95 коэффициент затухания $\exp(-\Delta T_R / \tau_R)$, а ошибку примем $\Delta\psi = 5$ мс, которая относится к случаю отсутствия устройств УК, т. е. $\sin \Delta\psi = 1$, тогда получим

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

Указанные условия можно использовать для построения зависимости $R = f(K)$ требуемого сопротивления резистора от коэффициента компенсации зарядной мощности линии (рис. 4). Для ВЛ 500 и 750 кВ указанные 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). Однако при любом заданном коэффициенте K для выключателя 750 кВ всё же нужен резистор более высокого сопротивления, чем для выключателя 500 кВ, поскольку у первого индуктивность больше, а значит затухание хуже.

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

При работе выключателей, оснащённых резисторами, аperiodический ток может возникать дважды — при подаче напряжения на линию через резистор и в случае шунтирования резистора. Обе составляющие опасны для элегазового выключателя, если вслед за включением ему придётся выполнять коммутацию отключения. Если резистор имеет сопротивление более 500 Ом, его шунтирование, как правило, вызывает ин-

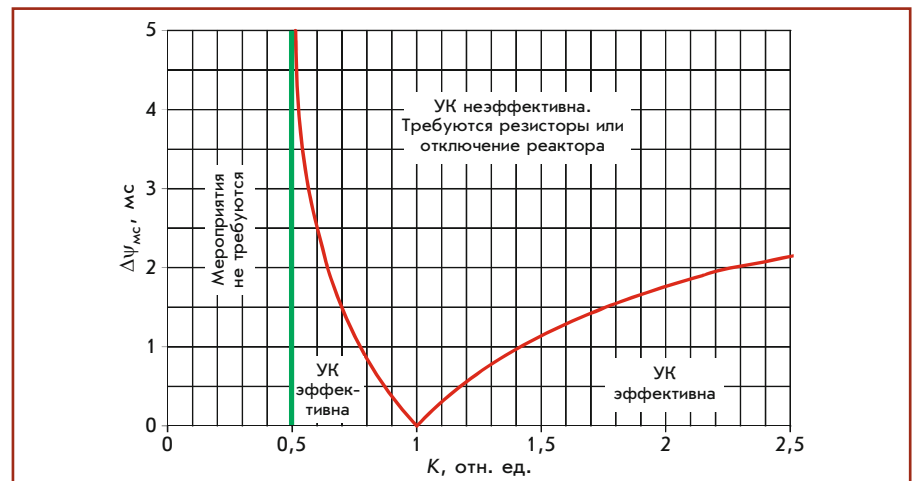


Рис. 3. Точность УК в зависимости от коэффициента компенсации зарядной мощности ВЛ 500 – 750 кВ

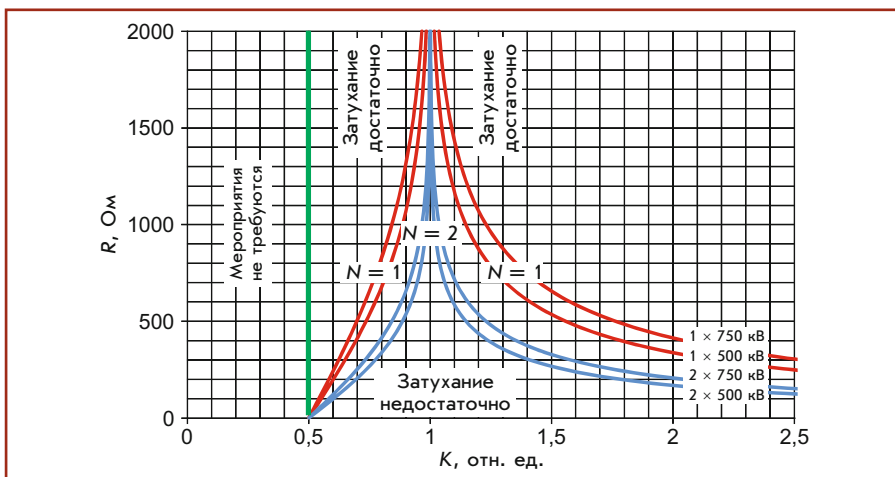


Рис. 4. Зависимость сопротивления ПР от коэффициента компенсации зарядной мощности ВЛ 500 – 750 кВ

тенсивный переходный процесс, поэтому его использование бессмысленно для борьбы с токами.

Согласно рис. 4 и используя предельное значение 500 Ом, можно получить следующие границы неэффективной работы выключателей 500 кВ с резисторами на линиях с одним реактором ($0,75 < K < 1,55$) и двумя реакторами ($0,9 < K < 1,15$). Для выключателей 750 кВ расчёты представляют чуть более широкий диапазон $0,7 < K < 1,8$ (с одним реактором) и $0,85 < K < 1,2$ (с двумя реакторами).

Данные (см. рис. 4) свидетельствуют, что на ВЛ 500 – 750 кВ с близкой к 100 % компенсации зарядной мощности выключатели с ПР 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 значения которого зависит гашение дуги и успешность ОАПВ.

Опыт показывает, что нейтральные реакторы по ряду причин так и «не прижились» в сетях. Они были законсервированы или вовсе демонтированы даже на тех ВЛ, где предусматривались для выполнения своего основного назначения — компенсации электростатической составляющей тока подпитки в паузу ОАПВ.

На основе формул [3] можно получить кратность повышения напряжения U на отключённой фазе ВЛ (относительно фазного значения напряжения сети E), которая устанавливается

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 ней-

трали линейных ШР, ($X_N = 0$ — отсутствие нейтрального реактора); $n = b_1/b_m$ и $m = b_1/(b_1 - b_m)$ — коэффициенты, зависящие от конструкции ВЛ, (b_1 и b_m — ёмкостная проводимость линии по прямой последовательности и межфазная соответственно).

На рис. 5 представлены расчёты кратности по формуле (4) для ВЛ: 500 кВ (принято $n \approx 11,5$ и $m \approx 1,1$); 750 кВ ($n \approx 10,4$ и $m \approx 1,1$). Из рис. 5 следует, что для ВЛ 500 – 750 кВ с близкой к 100 % компенсацией и реактором в нейтрали ШР установившееся значение напряжения при ОАПВ будет выше 0,5 напряжения сети, что уже может вызвать повторные пробои в месте, где погасла дуга подпитки, т. е. снижается вероятность успешного ОАПВ.

На самом деле восстановление напряжения после гашения дуги тока подпитки происходит в биениях [5], и его максимальное значение в переходном процессе оказывается заметно выше установившегося (см. рис. 5). Это напряжение способно не только вызвать повторные пробои в месте гашения дуги, но и повредить оборудование линии (при отсутствии повторных пробоев). Таким образом, нейтральные реакторы неэффективны при их

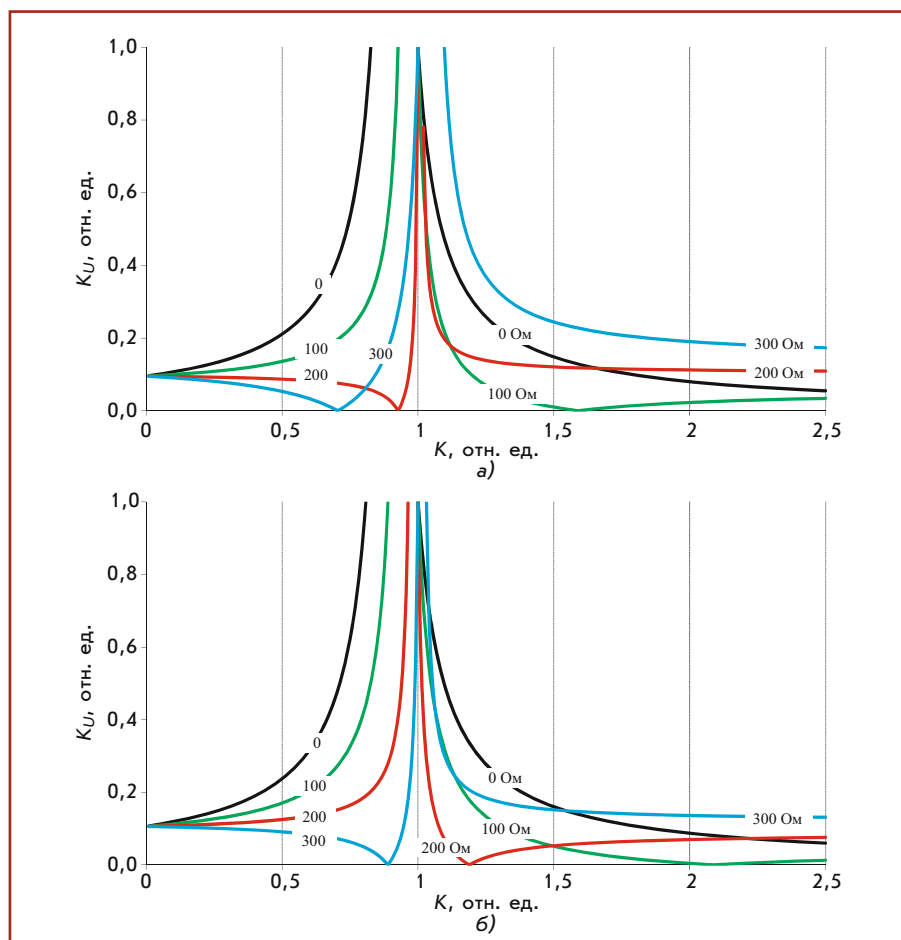


Рис. 5. Зависимость кратности установившегося повышения напряжения частотой 50 Гц на отключённой фазе ВЛ 500 кВ (а) и ВЛ 750 кВ (б) в бестоковую паузу ОАПВ от индуктивного сопротивления нейтрального реактора и коэффициента компенсации

использовании для ограничения резонансных перенапряжений в неполнофазных режимах ВЛ с близкой к 100 % компенсацией реактивной мощности.

Отключение линейного реактора

Управляемая коммутация и ГР неэффективны для ВЛ с компенсацией 80 – 120 %. Кроме того, их использование не решает проблему перенапряжений в неполнофазных режимах. На первый взгляд единственный универсальный для всех ВЛ способ борьбы с токами и перенапряжениями — отказ от коммутаций ВЛ с опасным числом реакторов. Однако и коммутация ВЛ 500 – 750 кВ с предварительно отключённым реактором имеет ряд особенностей и недостатков.

Во-первых, при этом теряется смысл его установки, поскольку основное назначение линейного ШР — ограничение на ВЛ повышенного напряжения промышленной частоты и помощь ОПН в ограничении коммутационных перенапряжений. Кроме того, коммутации реакторов, которые происходят чаще, чем это требуется по режимным условиям, приводят к излишнему износу реакторных выключателей и нежелательны для изоляции реакторов. Во-вторых, в ряде случаев существует риск повреждения выключателей ШР аperiodическими токами.

Приведём пример. Пусть в схеме на рис. 1 имел место нормальный режим работы, но на линии возникло однофазное КЗ. Если последнее произошло вблизи нулевого значения синусоиды

сетевое напряжение, в элементах схемы появятся аperiodические токи. Они будут в токах КЗ и линии (рис. 6, а), а также в токе фазы ШР, одноимённой с повреждённой фазой линии (рис. 6, б).

В токе выключателя ВЛ (см. рис. 6, а) помимо аperiodической составляющей существует периодическая, протекающая под действием напряжения сети частотой 50 Гц. Поэтому ток выключателей ВЛ переходит через нулевые значения, и выключатели ВЛ не будут иметь трудностей с отключением аварийной фазы ВЛ.

Примем, что на рассматриваемой ВЛ для борьбы с аperiodическими токами при включении ВЛ и с перенапряжениями в цикле ОАПВ используется отключение от линии шунтирующего реактора. В токе ШР (см. рис. 6, б) в отличие от тока выключателя ВЛ периодическая составляющая отсутствует, поскольку фаза реактора шунтирована местом КЗ, и напряжение сети уже не вызывает в реакторе тока частотой 50 Гц. Это значит, что в токе реактора есть лишь аperiodический ток, который замыкается по контуру «линия – место КЗ – земля – ШР» (см. рис. 1). Следовательно при попытке отключения тока ШР от тока линии колонковый элегазовый выключатель реактора может быть повреждён из-за отсутствия переходов тока через нулевые значения.

Следует отметить, что при КЗ на ВЛ в токе реактора всё же может появляться небольшая периодическая составляющая, когда, например, КЗ происходит на ВЛ на значительном

удалении от реактора и/или когда в месте КЗ имеется большое переходное сопротивление (10 Ом и более). Но даже в этих случаях периодическая составляющая теряется на фоне аperiodической, и первые нули тока появляются слишком поздно.

Таким образом, риск повреждения реакторного выключателя аperiodическим током есть для всех ВЛ независимо от их длины и коэффициента компенсации.

Перенос линейных реакторов на шины

Если реакторы, установленные на ВЛ и обеспечивающие близкую к 100 % компенсацию, вызывают столь серьёзные проблемы, единственно универсальное решение которых — отключение одного реактора на время коммутации ВЛ (да ещё с риском повреждения реакторного выключателя), возникает вопрос: Так ли необходимо стремиться к 100 %-ной компенсации зарядной мощности ВЛ линейными реакторами, или же часть этих реакторов целесообразно присоединить не к линии, а к сборным шинам РУ?

В сетях напряжением 500 – 750 кВ основное назначение шунтирующих реакторов — обеспечение приемлемых напряжений в режимах малых нагрузок (например, ограничение напряжения частотой 50 Гц в конце односторонне питаемых ВЛ от сети), а также баланса реактивной мощности. Размещение реакторов на линии (вместо шин) необходимо, прежде всего, для установления приемлемого уровня напряжения на ВЛ в режимах её одностороннего питания [1, 6].

Если это напряжение не представляет опасности для оборудования (например, в силу малой длины ВЛ), главным назначением реакторов становится баланс реактивной мощности, а выполнять такие функции могут как линейные, так и шинные ШР. Однако вариант присоединения реакторов к шинам РУ предпочтительней, поскольку это снизит степень компенсации зарядной мощности ВЛ индуктивностью линейных реакторов, избавит ВЛ от проблем с аperiodическими токами и перенапряжениями в неполнофазных режимах (ОАПВ и пр.).

Согласно [1] выбор мест установки реакторов должен быть основан на расчётах режимов напряжения. В целях определения возможности размещения реакторов не на ВЛ 500 – 750 кВ, а на шинах, выполним расчёты напряжения промышленной частоты в самом неблагоприятном случае — при её одностороннем питании от сети малой мощности.

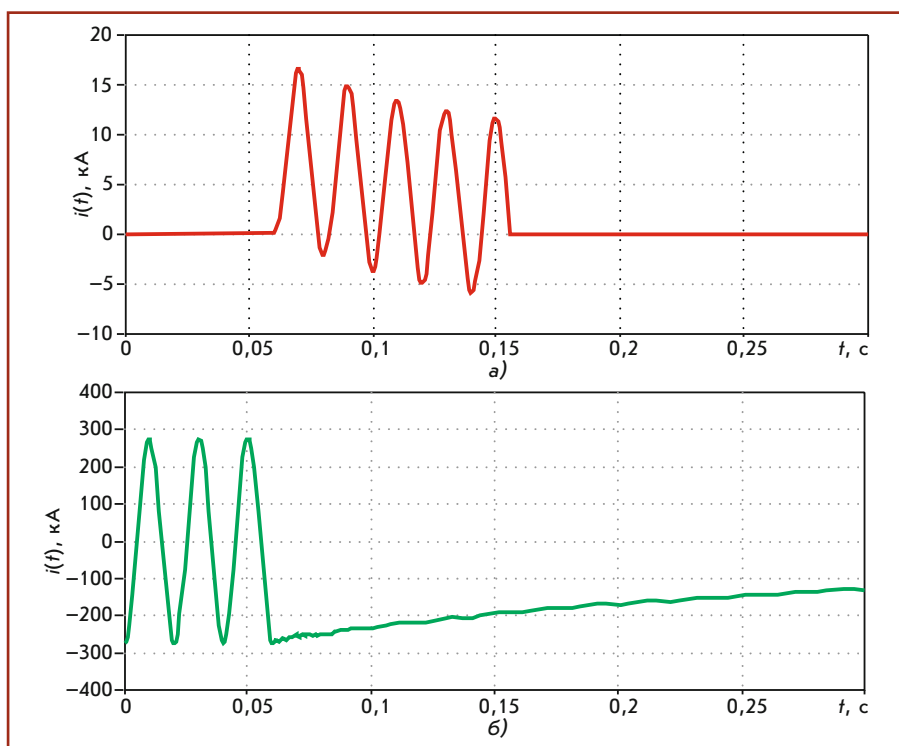


Рис. 6. Ток фазы выключателя ВЛ (а) и фазы реактора (б) при коротком замыкании на ВЛ

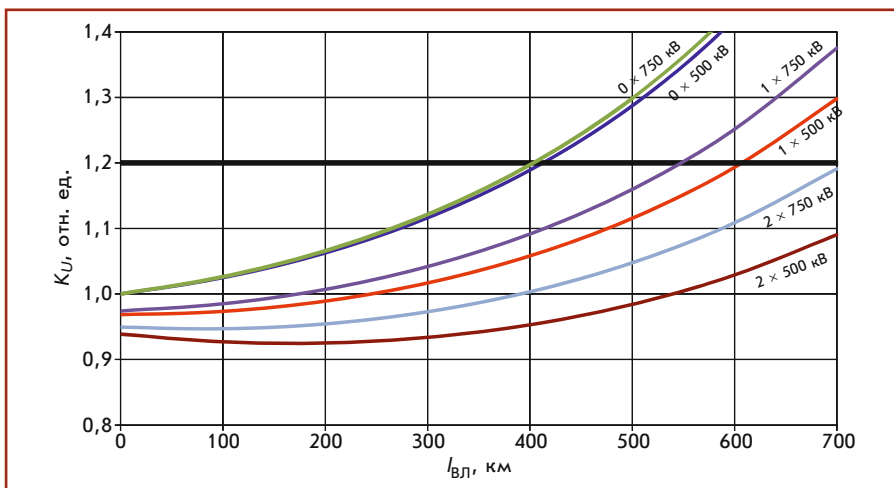


Рис. 7. Повышение напряжения в конце ВЛ 500 и 750 кВ типовой конструкции в зависимости от числа (ноль, один, два) присоединённых в её конце ШПР 500 кВ (180 Мвар) и 750 кВ (330 Мвар)

Расчёт напряжения на ВЛ при её одностороннем питании

Для проверки воздействий на оборудование и принятия решения о необходимости установки реактора на конце ВЛ рассчитываются следующие варианты:

- одностороннее питание ВЛ от сети (на время синхронизации);
- включение ВЛ на однофазное КЗ в её конце (на время работы токовой защиты).

Перенапряжения при одностороннем питании. Кратность повышения напряжения в конце односторонне питаемой ВЛ может быть определена по формуле

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

где E — фазное напряжение сети; $\lambda = 1,047 \cdot 10^{-3} l_{ВЛ}$ — волновая длина ВЛ по прямой последовательности, рад; $\alpha_p = \arctg(X_{p,k}/Z_b)$ [$X_{p,k} = X_p/N_k$ — эквивалентное индуктивное сопротивление (на 50 Гц) всех ШПР N_k , присоединённых в конце ВЛ, Z_b — волновое сопротивление линии по прямой последовательности (280 Ом для 500 кВ, 260 Ом для 750 кВ)]; $\alpha_c = \arctg(X_{p,k}/Z_b)$ (X_c — эквивалентное индуктивное сопротивление системы

(на частоте 50 Гц) по прямой последовательности).

Перенапряжения при включении на КЗ. Кратность повышения напряжения в конце односторонне питаемой ВЛ при её включении на КЗ рассчитывается по формуле

$$K_{U_m} = \sqrt{3} \frac{\sqrt{m^2 + m + 1}}{m + 2} K_U, \quad (6)$$

где K_U — кратность, определённая по формуле (5); $m = \left(\frac{3 I_k^{(3)}}{I_k^{(1)}} - 2 \right)$ — число,

которое в каждой точке сети можно найти по соотношению токов однофазного $I_k^{(1)}$ и трёхфазного $I_k^{(3)}$ КЗ.

Как правило, токи $I_k^{(1)}$ и $I_k^{(3)}$ в сетях 500 – 750 кВ отличаются незначительно вследствие принятых значений: $m \approx 1$, $K_{U_m} \approx K_U$. Поскольку ВЛ в режиме КЗ работает кратковременно, практически все расчёты по формуле (5) являются определяющими. Наибольшие перенапряжения по формуле (5) получаются при повышенном индуктивном сопротивлении системы X_c , т. е. для питающей сети малой мощности. На рис. 7 представлены результаты расчётов по формуле (5) при сопротивлении системы 50 Ом, что позволяет сделать незаниженные оценки повышенных напряжений, поскольку для сетей 500 – 750 кВ обычно $X_c < 50$ Ом.

Допустимое повышение напряжения промышленной частоты на оборудовании 500 – 750 кВ в зависимости от длительности воздействия указано в таблице. Даже если бы время одностороннего питания ВЛ составляло 20 мин, допустимыми для всего оборудования, присоединённого в конце линии, было бы напряжение с кратностью 1,10. С её учётом и на основании рис. 7 можно сделать вывод, 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. В случае допустимой кратности 1,20 при длинах ВЛ до 400 км (см. рис. 7) установка реакторов на линии не требуется. 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).

Выводы

1. В сетях 500 – 750 кВ сложилась практика, согласно которой на многих ВЛ имеется высокая (близкая к 100 %) компенсация зарядной мощности индуктивностью линейных ШПР, что приводит к появлению опасных для выключателей ВЛ аперiodических токов, а также опасных для всего оборудования ВЛ резонансных перенапряжений при неполнофазных режимах питания (например, ОАПВ).

2. Для ограничения аперiodических токов выключатели ВЛ 500 – 750 кВ можно оснащать блоками УК или предвключаемыми резисторами. Однако приобретение и эксплуатация такого оборудования обременительны. При этом такие устройства влияют только на аперiodические 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 этими токами.

3. Единственное мероприятие, позволяющее даже для самых неблагоприятных линий с 80 – 120 %-ной компенсацией ограничить до безопасных значений и токи и напряжения, — отключение перед коммутациями ВЛ 500 – 750 кВ какого-либо из линейных реакторов линии. Такое решение — «бесплатное», но имеет ряд недостатков, главный из которых — риск повреждения выключателя ШПР аперiodическими токами, возникающими при КЗ на ВЛ.

4. Основная причина размещения реакторов на линиях, а не на ши-

Оборудование	Номинальное напряжение, кВ	Допустимое повышение напряжения при разной 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, ёмкостные 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	—

нах – необходимость ограничения повышения напряжения в конце ВЛ в режиме её одностороннего питания. Согласно расчётам для ВЛ 500 – 750 кВ без линейных реакторов повышение напряжения, как правило, ещё приемлемо даже при длине ВЛ до 400 км. Линейные реакторы нужны для более длинных ВЛ.

5. Перечисленные выводы свидетельствуют в пользу того, чтобы по мере возможности отказываться от высокой (80 – 120 %) степени компенсации зарядной мощности ВЛ 500 – 750 кВ линейными реакторами. Число последних следует выбирать на компенсацию не более 60 – 70 % зарядной мощности ВЛ (остальная мощность компенсируется шинными реакторами).

6. При компенсации линейными реакторами не более 50 % зарядной мощности ВЛ проблем с апериодическими токами и перенапряжениями в неполнофазных режимах уже не существует. Вследствие этого повышается надёжность электросети, проводится унификация оборудования и применяемых технических решений, снижается стоимость строительства и эксплуатации.

7. Методологию выбора числа и мест установки реакторов в сетях 500 – 750 кВ (и 110 – 330 кВ, где в последние годы все чаще предусматривается установка ШР) следует обсудить с привлечением широкого круга специалистов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СО 153-34.47.43–2003. Методические рекомендации по проектированию развития энергосистем. — М.: Минэнерго РФ.

2. Дмитриев М. В. Методика выбора мероприятий по борьбе с апериодическими токами ВЛ 500 – 750 кВ // Новости Электротехники. 2012. № 4(77).

3. Однофазное автоматическое повторное включение на линиях с управляемым шунтирующим реактором / М. В. Дмитриев, Г. А. Евдокунин, А. Г. Долгополов и др. // Энергетик. 2012. № 4. С. 19 – 24.

4. Рокотян С. С., Шапиро И. М. Справочник по проектированию электроэнергетических систем. 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 352 с.

5. Процессы при однофазном повторном включении линий высоких напряжений / Н. Н. Беляков, К. П. Кадомская, М. Л. Левинштейн и др. — М.: Энергоатомиздат, 1991.

6. Евдокунин Г. А. Электрические системы и сети. — СПб.: Изд-во ООО Синтез Бук, 2011. — 284 с.

7. Правила технической эксплуатации электростанций и сетей РФ. — М.: Изд-во ООО Энергосервис, 2003.