

ВЫВОДЫ

1. Получена приближенная явная формула для определения критерия электродинамического действия токов КЗ – допустимого импульса ЭДУ, который является комбинацией параметров и геометрических размеров проводов и минимального допустимого расстояния между фазами. Установлены величины $S_{\text{доп}}$ для наиболее часто применяемых типовых пролетов и проводов ОРУ 110, 220 и 330 кВ.

2. Получено дополнительное условие проверки недопустимых отклонений и сближений проводов гибкой ошиновки РУ по величинам расчетного и допустимого импульсов ЭДУ, достоверность которого подтверждается расчетами по КП BUSEF.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
2. Кудрявцев Е. П., Неклепаев Б. Н. Расчет смещений гибких проводников при коротких замыканиях // Электричество. – 1993. – № 5. – С. 17–25.
3. Выбор расчетных условий при проверке гибкой ошиновки РУ на электродинамическую стойкость при КЗ / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей: Ред. журнала «Изв. вузов СССР – Энергетика». – Минск, 1981. – 18 с. – Деп. в Информэнерго 01.01.1981. – № 2451. – ЭН // РЖ: 22 энергетика. – 1981. – № 8. – 7Е58 ДЕП. – С. 8.
4. Стрелюк М. И., Сергей И. И., Бладыко Ю. В. Приближенная проверка гибкой ошиновки распределительных устройств и проводов воздушных линий при коротком замыкании // Энергетика и транспорт. Изв. АН СССР. – 1989. – № 4. – С. 83–89.
5. Сергей И. И., Пономаренко Е. Г., Саммур Ваиль Махмуд. Упрощенный метод расчета сближения проводов с учетом конструктивных элементов распределительных устройств при двухфазном коротком замыкании // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2004. – № 2. – С. 5–11.
6. ГОСТ 30323–95. Короткие замыкания в электроустановках: Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания. – Введ. 01.03.1999. – Мн., 1999. – 57 с.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 3.03.2004

УДК 621.315

О ПАРАМЕТРАХ КОМПЕНСАТОРОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Засл. деят. науки и техники Республики Беларусь,
докт. техн. наук, проф. ПОСПЕЛОВ Г. Е.

Белорусский национальный технический университет

Электропередачи должны передавать, прежде всего, активную мощность в соответствии с графиком нагрузки. Имея в виду это обстоятельство, проблему снабжения потребителей реактивной мощностью следует ре-

шать наиболее экономичным способом. Для решения этой задачи приходится обращаться к источникам реактивной мощности – нерегулируемым и регулируемым. Роль регулируемых источников реактивной мощности обычно выполняют генераторы и синхронные компенсаторы, а нерегулируемых – батареи статических конденсаторов. Сравнительно меньшие эксплуатационные расходы и стоимость последних привели к многочисленным нерегулируемым источникам реактивной мощности, а нередко – к избыточной емкостной мощности.

В существующих протяженных электропередачах, которые обладают значительным емкостным эффектом, в настоящее время применяются шунтирующие реакторы. Функции, возлагаемые на них, довольно разнообразны.

Установка в начале линии шунтирующих реакторов, компенсирующих в определенной степени емкостную проводимость линии, производится для повышения ЭДС генераторов, поддержания определенной величины отстающего коэффициента мощности генераторов, необходимого перепада напряжений ЛЭП, улучшения статической и динамической устойчивости и выполнения условий синхронизации.

При известных условиях может возникнуть явление самовозбуждения генераторов, работающих на электропередачу; при этом воздействие на возбуждение генераторов не дает желаемого снижения напряжения в линии. Соответственно подобранные величины проводимостей шунтирующих реакторов позволяют избежать появления самовозбуждения генераторов.

Шунтирующий реактор благодаря своему регулируемому эффекту в какой-то мере может выполнять роль простейшего регулятора напряжения.

Основное назначение включения шунтирующих реакторов в промежуточных точках линии – выравнивание и снижение напряжения линии; шунтирующие реакторы ограничивают внутренние перенапряжения.

Цель данной статьи – получить определенные рекомендации для выбора основных параметров шунтирующих реакторов и других компенсаторов реактивной мощности в электропередачах переменного тока.

Для характеристики влияния параллельной индуктивной компенсации на свойства линии представим параллельно включенные индуктивные элементы, распределенные равномерно вдоль линии электропередачи, которые уменьшают емкость линии в k раз. Тогда волновое сопротивление линии

$$z_b = \sqrt{\frac{Lk}{C}}$$

увеличится в \sqrt{k} раз, а волновая длина линии

$$\lambda = \omega l \sqrt{\frac{LC}{k}}$$

уменьшится в \sqrt{k} раз. Из этого следует, что натуральная мощность

$$P_H = \frac{U^2}{z_b}$$

уменьшится в \sqrt{k} раз, а эквивалентное сопротивление

$$x_3 = \sin \lambda$$

в относительных единицах ($z_{\text{баз}} = z_n$) снизится меньше, чем в \sqrt{k} раз.

Таким образом, параллельная компенсация несколько понижает пропускную способность линии, но в целом на систему передачи индуктивная параллельная компенсация оказывает благоприятное действие. Параллельно включенная индуктивность, компенсируя зарядный ток линии, увеличивает ЭДС генератора и таким образом повышает устойчивость параллельной работы. Ранее показано [1], что, используя шунтирующий реактор достаточной мощности, можно передать любую мощность на любое расстояние, если это целесообразно и не было каких-либо ограничений. Исследования синхронизирующего момента генераторов удаленной электростанции в зависимости от проводимости шунтирующего реактора, произведенные на основе уравнений Горева – Парка, дали аналогичные результаты [2].

Однако учет ограничений по возбуждению генераторов дал другие результаты. Натуральную мощность при включенном шунтирующем реакторе в начале линии при постоянстве возбуждения генераторов можно передать на расстояние $l_1 = 450$ км, при постоянстве потокосцепления обмотки ротора – генератор с АРВ пропорционального действия – на $l_2 = 650$ км [3]; при АРВ сильного действия, обеспечивающего постоянство напряжения в начале линии, независимо от реактора – на $l_3 = 940$ км [3]*.

При больших расстояниях необходимы более эффективные средства. Таковыми могут быть продольная компенсация индуктивного сопротивления ЛЭП [3] или вариант электропередачи с регулируемым шунтирующими реакторами в сочетании с линиями повышенной пропускной способности [4].

Анализ зависимостей распределения напряжения линии от размещения реактора, произведенный в [3], показал, что наиболее рациональным местом включения реактора, по условиям распределения напряжения вдоль линии и мощности синхронных компенсаторов в конце линии, следует считать начало линии, если при этом повышение напряжения не будет превосходить допустимых величин. При равенстве напряжения по концам линии превышение напряжения не составит более 5 % напряжений концов линии для дальностей менее 560 км.

При ограничении мощности реакторов требуемой величиной коэффициента мощности генераторов удаленной электростанции их проводимость определится по формуле [3]

$$b = p \operatorname{tg} \varphi_r + \frac{\sqrt{1 - p^2 \sin^2 \lambda} - \cos \lambda}{\sin \lambda}, \quad (1)$$

где p – передаваемая активная мощность в долях натуральной; φ_r – угол коэффициента мощности генераторов удаленной электростанции.

* При коэффициенте запаса статической устойчивости 0,20.

Зависимости, характеризующие (1), представлены на рис. 1 в виде кривых $b = f(l)$, построенных на основе этого соотношения для различных значений $\cos\varphi_r$ и удельной передаваемой мощности; при этом соответствие номеров кривых значениям $\cos\varphi_r$ и p на рис. 1 определяется по табл. 1.

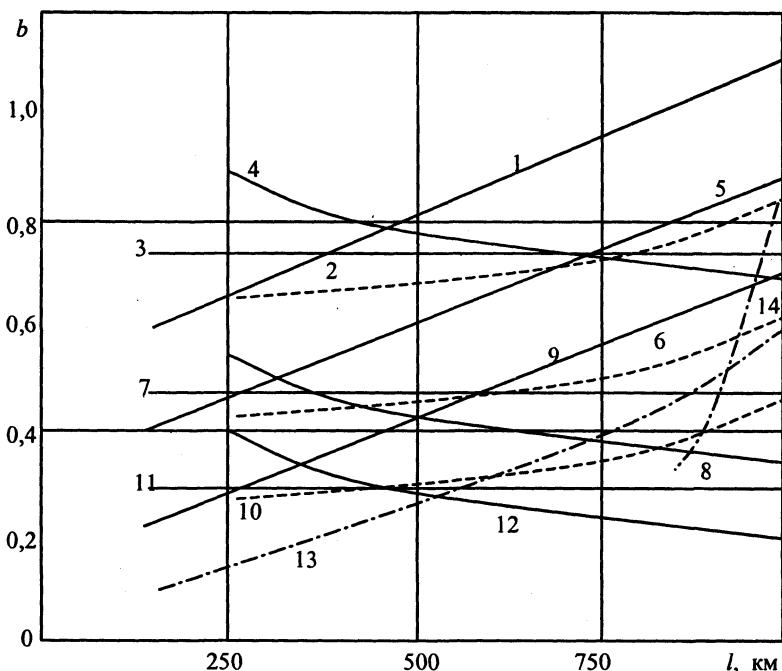


Рис. 1. Зависимости проводимости компенсатора реактивной мощности ЛЭП от дальности

Таблица 1

$\cos\varphi_r$	Удельная передаваемая мощность, p			
	0,8	0,9	1	1,2
0,8	1	2	3	4
0,9	5	6	7	8
0,95	9	10	11	12

Ориентируясь на передачу натуральной мощности $p = 1$, получим $b = \operatorname{tg}\varphi_r$, т. е. в этом случае проводимость шунтирующих реакторов остается величиной постоянной, не зависящей от дальности передачи (рис. 1, кривые 3, 7, 11). При передаче активной мощности, меньшей натуральной, проводимость шунтирующих реакторов с увеличением длины линии возрастает (рис. 1, кривые 1, 2, 5, 6, 9, 10); возрастание тем круче, чем меньше активная мощность. При передаче активной мощности, большей натуральной, проводимость шунтирующих реакторов по мере увеличения длины линии уменьшается (рис. 1, кривые 4, 8, 12).

Рассмотрим требования, предъявляемые к шунтирующим реакторам условиями синхронизации, режимами холостого хода и подъема напряжения линии с нуля.

При отсутствии перепада напряжений в линии, отключенной с отправного конца, проводимость шунтирующего реактора в начале линии будет равна

$$b = q_p = \frac{\cos \Theta_d - \cos \lambda}{\sin \lambda}$$

или, учитывая, что рассматриваемый режим – режим холостого хода, найдем

$$b = \frac{1 - (1 - 2 \sin \frac{2\lambda}{2})}{2 \sin \frac{\lambda}{2} \cos \frac{\lambda}{2}} = \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2}. \quad (2)$$

Здесь q_p – мощность реактора на базе натуральной мощности линии.

Зависимость (2) отображена на рис. 1 (кривая 13). Эта кривая для электропередачи длиной менее 500 км лежит ниже кривых, построенных по (1), т. е. проводимость шунтирующего реактора выбирается из условия заданного коэффициента мощности генератора.

Для электропередачи длиной более 500 км при передаче мощностей, равных или больших натуральной, и $\cos \varphi_r = 0,95$ (рис. 1, кривые 11, 12) проводимость шунтирующего реактора определяется режимом холостого хода (кривая 13); при передаче мощностей, меньших натуральной, и $\cos \varphi_r < 0,95$ проводимость шунтирующего реактора следует определять по режиму работы генератора (кривые 1...10).

Для устранения самовозбуждения генераторов результирующая индуктивная проводимость отпавной системы – генератора, трансформатора и шунтирующего реактора – должна быть больше результирующей входной проводимости линии:

$$\frac{1}{x_L} + \frac{1}{x_d + x_T} > \operatorname{tg} \lambda$$

или

$$b > \operatorname{tg} \lambda - \frac{1}{x_d + x_T}, \quad (3)$$

где x_L – индуктивное сопротивление реактора; x_d – синхронное сопротивление компенсирующего генератора по продольной оси; x_T – индуктивное сопротивление трансформатора; $\operatorname{tg} \lambda$ – результирующая входная проводимость линии.

Все величины выражены в относительных единицах.

При наличии автоматических регуляторов возбуждения без зоны нечувствительности пропорционального действия потребуется меньшая величина проводимости шунтирующего реактора, так как генератор в этом случае учитывается переходным сопротивлением

$$b > \operatorname{tg} \lambda - \frac{1}{x'_d + x_T}.$$

Построенная по условиям самовозбуждения (3) кривая $b = f(l)$ (рис. 1, кривая 14) круто возрастает для электропередачи длиной более 800 км. Для передачи длиной менее 800 км условия самовозбуждения не требуют установки шунтирующих реакторов. Для электропередачи длиной 800...1000 км необходима проверка выбранной величины проводимости шунтирующего реактора по условиям самовозбуждения в зависимости от режима ра-

боты генератора. Однако необходимо учитывать, что при определенных расстояниях по условиям напряжения линии требуется установка шунтирующих реакторов в промежуточных точках электропередачи. При работе линии без перепада напряжений ($U_1 = U_2 = U$) в режиме холостого хода напряжение в средней точке линии уже при расстояниях свыше 650 км составит более 105 % U и при дальности свыше 800 м – более 110 % U . Поэтому, начиная с известных расстояний, определение необходимой мощности шунтирующих реакторов, включаемых в начале линии, целесообразно произвести после выбора мощностей компенсирующих устройств и схемы включения их вдоль ЛЭП, так как при такой последовательности величина мощности шунтирующего реактора в начале линии определяется с учетом величины и расположения всех компенсирующих устройств. В отдельных случаях, возможно, и не потребуются устанавливать реакторы в начале линии.

Выбор шунтирующих реакторов не может быть произведен вне зависимости от других компенсирующих устройств электропередачи и схемы их включения. Введение в линию последовательных конденсаторов приводит к необходимости изменения мощности шунтирующих реакторов, подключаемых к линии. Изменению мощности шунтирующих реакторов при заданных передаваемой мощности и расстоянии соответствуют определенные изменения мощности последовательной компенсации.

Таким образом, действия обоих видов компенсирующих устройств взаимосвязаны, и выбор их параметров должен производиться одновременно.

Помимо пропускной способности, определяемой устойчивостью при установке компенсирующих устройств в дальних электропередачах, необходимо учитывать условия режимов и устранения перенапряжений в линиях передачи. При этом желательно получить сочетание компенсирующих устройств, соответствующее минимуму затрат. Поэтому интересно выяснить экономически целесообразное соотношение последовательной конденсаторной и параллельной индуктивной компенсации при совместном применении для повышения пропускной способности системы передачи. Установив указанное соотношение, рассмотрим этот вопрос применительно к электропередам, у которых определяющими условиями для выбора параллельной индуктивной компенсации служат условия устранения перенапряжений нормальных режимов.

Приняв П-образную схему замещения линии, предположим, что емкостная проводимость приемного конца линии полностью используется для повышения коэффициента мощности приемной энергосистемы, а емкостная проводимость передающего конца b_c в той или иной степени компенсируется индуктивной проводимостью включенного в начале линии реактора.

Стоимость конденсаторной установки для компенсации индуктивности линии может быть представлена выражением

$$A_c = a_c x_n k_c p^2 P_{\text{нат}} \cdot 10^3, \text{ руб.},$$

где a_c – стоимость 1 установленного кВ · А конденсаторной установки; x_n – индуктивное сопротивление линии; k_c – степень последовательной компен-

сацией; p – удельная передаваемая мощность; $P_{\text{нат}}$ – натуральная мощность линии.

Аналогично стоимость параллельной индуктивной компенсации составит

$$A_L = a_L b_c k_L P_{\text{нат}} \cdot 10^3, \text{ руб.}$$

Здесь A_L – затраты, связанные с установкой 1 кВ · А индуктивной параллельной компенсации, $k_L = \frac{b}{b_c}$.

Суммарная стоимость компенсирующих устройств

$$A_k = (a_c x_{\text{л}} k_c p^2 + a_L b_c k_L) P_{\text{нат}} \cdot 10^3, \text{ руб.}$$

На рис. 2 построены кривые $A_k/P_{\text{нат}}$ в функции от k_c для $l = 600$ км и $p = 1$; на рисунке нанесена та же шкала соответствующих значений k_L . Для принятых значений p , l и обычных параметров генераторов и трансформаторов k_c и k_L определялись из условия сохранения запаса статической устойчивости, равного 0,20; предполагалось, что напряжение и частота на шинах приемной системы остаются неизменными.

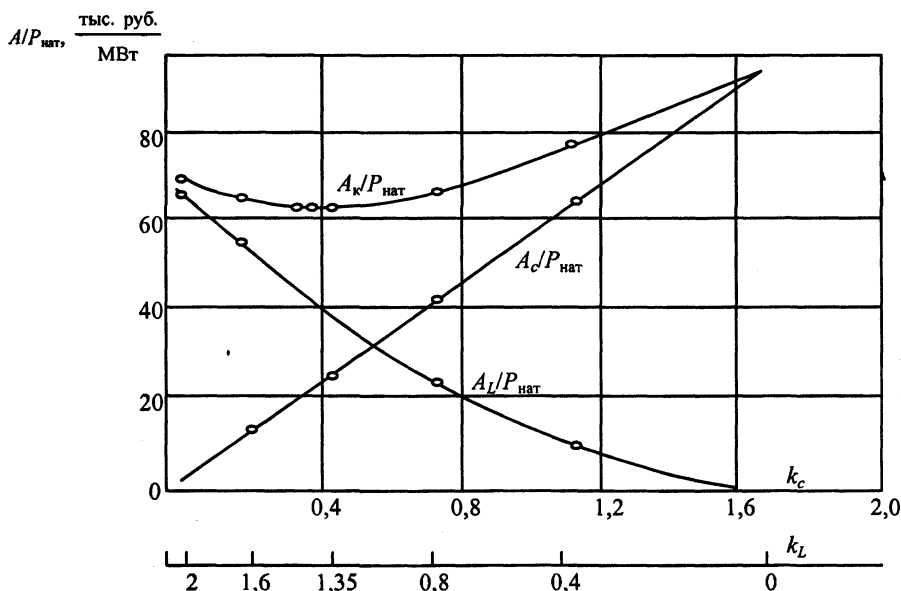


Рис. 2. Зависимости стоимости компенсирующих устройств от степеней компенсации

В общем случае при работе электропередачи на шины постоянного напряжения и частоты степени последовательной и параллельной компенсации, соответствующие минимуму стоимости компенсирующих устройств, определены формулами (4) и (5) [3] при коэффициенте статической устойчивости $z_c = 0,20$:

$$k_c = 1 - \frac{0,38}{p \sin \lambda}; \quad (4)$$

$$k_L = 1,12 - 0,06 \sin \frac{2\lambda}{2}, \quad (5)$$

т. е. примерно

$$k_L = 1.$$

Таким образом, емкость линии должна быть полностью компенсирована.

ВЫВОДЫ

1. Для оптимизации режимов электропередачи напряжением 330 кВ и выше необходимо применение параллельной компенсации в виде источников реактивной мощности.

2. Полученные соотношения и графические зависимости позволяют определять параметры устройств параллельной компенсации по различным условиям.

3. Наиболее эффективна параллельная компенсация в сочетании с электропередачами повышенной пропускной способностью или с продольной емкостной компенсацией. При этом степень параллельной компенсации из условий минимума затрат получается равной примерно единице.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поспелов Г. Е. О предельной компенсации параметров электропередачи // Электричество. – 1952. – № 2. – С. 12–16.
2. Казарновский Д. М. Увеличение синхронизирующей мощности при однофазной компенсации емкостной проводимости линии передачи // Труды ЛИИ. – 1940. – № 3.
3. Поспелов Г. Е. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередачи. – Мн.: Вышэйш. шк., 1967. – 311 с.
4. Александров Г. Н. Передача электрической энергии переменным током. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 18.12.2003

УДК 621.311

АЛГОРИТМ РЕАЛИЗАЦИИ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И ИХ ПОДАВЛЕНИЯ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Докт. техн. наук, проф. ДМИТРИЕВ Е. В., докт. техн. наук ГАШИМОВ А. М.,
канд. техн. наук ПИВЧИК И. Р., инж. БАБАЕВА А. Р.

Институт физики НАН Азербайджана

В электрических сетях в неполнофазных режимах при взаимодействии нелинейных индуктивностей намагничивания магнитопроводов трансформаторов с емкостями электрооборудования электрических систем возникают феррорезонансные явления, которые вызывают на шинах распределительных устройств (РУ) длительные перенапряжения, опасные для ограничителей перенапряжений (ОПН) и другого оборудования РУ.