

УДК 621.311

## ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЕНСАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЛЭП И ПОВЫШЕНИИ ИХ УПРАВЛЯЕМОСТИ

Засл. деятель науки и техн. РБ, докт. техн. наук, проф. ПОСПЕЛОВ Г. Е.

*Белорусский национальный технический университет*

Компенсация параметров линий – емкости и индуктивного сопротивления – наиболее естественное средство повышения их пропускной способности и управляемости [1].

Для компенсации индуктивного сопротивления линии наибольшее распространение получила продольная компенсация посредством батарей статических конденсаторов. Так, согласно [2], «среди устройств FACTS, установленных к настоящему времени в энергосистемах мира с целью повышения пропускной способности линий электропередачи, снижения потерь и стабилизации уровней напряжения, лидирующие позиции по количеству объектов и установленной мощности оборудования занимают статические тиристорные компенсаторы и установки продольной компенсации (их несколько сотен)». Однако наряду с этим «при длине линий свыше 400 км продольная емкостная компенсация неэффективна» [3].

В данной статье устанавливаются действительная эффективность продольной емкостной компенсации индуктивного сопротивления линий электропередачи и условие целесообразной ее применимости.

Остановимся на необходимости компенсации емкости линии. В качестве примера рассмотрим работу электростанции на короткую и длинную линии (табл. 1). В варианте короткой линии ее длина  $l = 110$  км и при напряжении линии  $U = 110$  кВ коэффициент запаса статической устойчивости получился недостаточный; переход к напряжению 220 кВ обеспечивает достаточный запас устойчивости без каких-либо дополнительных средств. В варианте с длиной линии  $l = 1000$  км при напряжении  $U = 400$  кВ недостаточен запас статической устойчивости; переход к напряжению  $U = 500$  кВ показал еще более низкий уровень устойчивости. Включение в начале линии при этом напряжении шунтирующего реактора, компенсирующего частично емкость линии, обеспечило достаточный запас статической устойчивости.

Таким образом, для реализации эффекта повышения номинального напряжения протяженных линий передачи необходимо применение устройств, компенсирующих емкостную проводимость линий.

В системах передачи с продольной компенсацией шунтирующие реакторы установлены для компенсации емкости линии, повышают, как показано [1; 4], эффективность продольной компенсации. Согласно [4] управляемый шунтирующий реактор представляет широкие возможности для создания управляемой продольной компенсации; он позволяет существенно повысить эффективность продольной компенсации. Благоприятное действие управляемых шунтирующих реакторов предполагается использовать во Вьетнаме в системе передачи 500 кВ с продольной компенсацией [5].

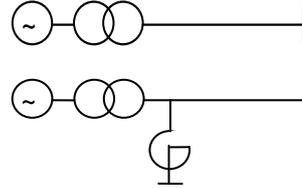
Эффективность продольной компенсации определяется значением эквивалентного сопротивления, на которое уменьшается суммарное индуктивное сопротивление системы передачи [1]:

$$x_{c3} = x_{л} k_c k_3, \quad (1)$$

где  $k_c = x_k/x_{л}$  – степень компенсации;  $x_k$  – емкостное сопротивление установки продольной компенсации (УПК);  $x_{л}$  – индуктивное сопротивление линии;  $k_3$  – коэффициент эффективности продольной компенсации.

Таблица 1

Вариант короткой ЛЭП	
$l = 110$ км; $P = 150$ МВт; $z_b = 400$ Ом – волновое сопротивление:	
а) $U = 110$ кВ; $\Theta = 67,9^\circ$ ; $z_c = 8\% < 20\%$ ; $\Theta$ – угол между ЭДС $E$ и напряжением $U_2$ ;	
б) $U = 220$ кВ; $\Theta = 46,4^\circ$ ; $z_c = 38,1\% > 20\%$	
Вариант протяженной ЛЭП	
$l = 1000$ км; $P = 150$ МВт; $z_b = 252$ Ом; провод расщепленный:	
а) $U = 400$ кВ; $\Theta = 99,4^\circ$ – неуст.;	
б) $U = 500$ кВ; $\Theta = 110,8^\circ$ – неуст.;	
в) $U = 500$ кВ в начале ЛЭП Ш.Р. $b_p = 0,706$ ;	
$\Theta = 55^\circ$ ; $z_c = 22\% > 20\%$	



Эквивалентное емкостное сопротивление, вычитаемое из индуктивного сопротивления системы передачи:

$$x_{c3} = x_k k_3, \quad (2)$$

Коэффициент эффективности продольной компенсации  $k_3$  – это число, на которое нужно умножить емкостное сопротивление продольной компенсации  $x_k$ , чтобы получить эквивалентное емкостное сопротивление, вычитаемое из индуктивного сопротивления систем передачи.

Рассмотрим электропередачу с УПК, схема которой изображена на рис. 1. Каждую половину линии электропередачи представим четырехполюсником  $[A_1]$ , компенсирующее устройство –  $[A_2]$ , а для всей электропередачи запишем

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = [A_1][A_2][A_2] \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Обобщенная постоянная  $B$  эквивалентного четырехполюсника, равная эквивалентному сопротивлению, при П-образной схеме замещения электропередачи рассчитывается из выражения [6]

$$\underline{B} = z_B \operatorname{sh} \lambda - j z_B^2 b \operatorname{sh}^2 \lambda_1 - j x_k \left( \operatorname{ch}^2 \lambda_1 - \frac{b^2 z_B^2}{4} \operatorname{sh}^2 \lambda_1 - j \frac{b z_B}{2} \operatorname{sh} \lambda \right), \quad (4)$$

где  $z_B$  – волновое сопротивление линии;  $\lambda_1, \lambda_2$  – волновые длины соответственно всей линии передачи и ее половины.

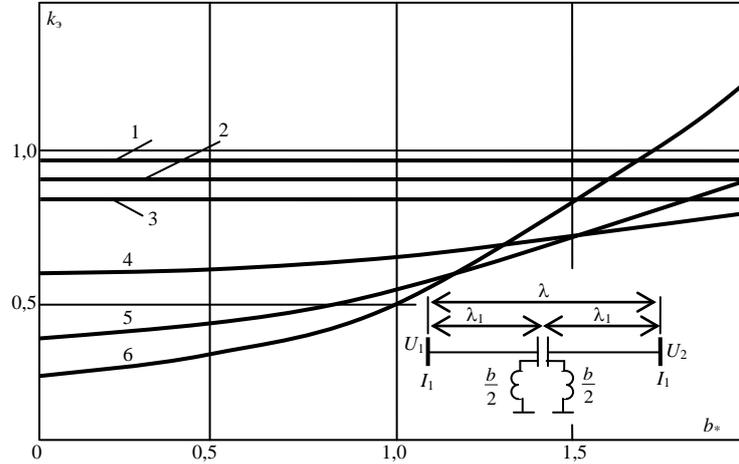


Рис. 1. Зависимость пропускной способности ЛЭП с учетом потерь активной мощности от проводимости шунтирующих реакторов

Здесь согласно [6] учитываются потери активной мощности линии передачи, поэтому коэффициент при  $x_k$  – комплексное число; его мнимая составляющая определит дополнительно активное сопротивление, и только вещественная составляющая может рассматриваться как коэффициент эффективности последовательной компенсации

$$k_3 = \operatorname{Re} \left( \operatorname{ch}^2 \lambda_1 - \frac{b^2 z_B^2}{4} \operatorname{sh}^2 \lambda_1 - \frac{b z_B}{2} \operatorname{sh} \lambda \right). \quad (5)$$

Так как исходная схема (рис. 1) не содержит конечных устройств системы, полученное выражение (5) справедливо при условии сильного регулирования возбуждения генераторов, при котором обеспечивается постоянство напряжения в начале линии и не учитывается влияние сопротивлений генераторов на пропускную способность системы передачи по условиям статической устойчивости.

При пренебрежении активными потерями в линии передачи коэффициент при  $x_k$  не содержит мнимой составляющей, а содержит только вещественную составляющую

$$k_3 = \cos^2 \lambda_1 - \frac{b^2 z_B^2}{4} \sin^2 \lambda_1 + \frac{b z_B}{2} \sin \lambda. \quad (6)$$

На основе (5) и (6) на рис. 1 и 2 построены зависимости коэффициента эффективности продольной компенсации от проводимости шунтирующих реакторов, которая выражена в долях проводимости плеча П-образной схемы замещения соответствующего участка линии электропередачи ( $b_* = b/y_n$ ).

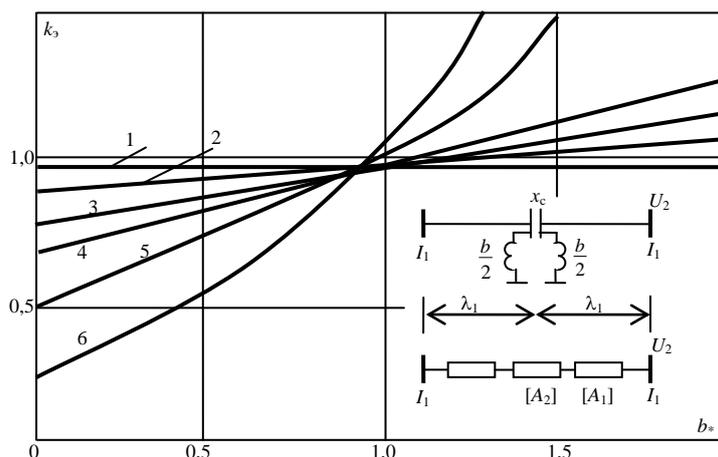


Рис. 2. Зависимость пропускной способности ЛЭП без потерь от проводимости шунтирующих реакторов

Рис. 1 соответствует зависимости для линии с учетом потерь активной мощности, рис. 2 – для линии без потерь; кривые соответствуют длинам линий: 1 – 200 км; 2 – 500; 3 – 700; 4 – 1000; 5 – 1500; 6 – 2000 км.

Зависимости рис. 1 и 2 показывают возможности регулирования продольной компенсацией индуктивного сопротивления электропередач при помощи проводимости шунтирующих управляемых реакторов; благодаря этому регулированию продольная емкостная компенсация эффективна и для протяженных электропередач.

Рассмотрение [2] сравнительной эффективности использования для повышения пропускной способности электрических сетей статических тиристорных компенсаторов, устройства СТАТКОМ и продольной компенсации индуктивного сопротивления линий показало, что самым эффективным способом оказалась продольная компенсация. Аналогичный результат дали исследования [7].

Следует отметить возможности продольной компенсации как средства повышения динамической устойчивости и статической устойчивости послеаварийного режима системы передачи [8]. В этом случае она называется послеаварийной продольной компенсацией, так как включается в послеаварийном режиме и уменьшает относительное эквивалентное реактивное сопротивление системы передачи в послеаварийном режиме. Одна из схем такой компенсации показана на рис. 3 [8].

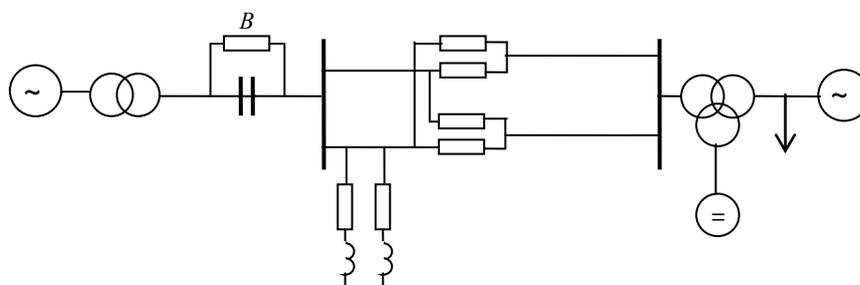


Рис. 3. Схема системы передачи с послеаварийной продольной компенсацией

## ВЫВОДЫ

1. Продольная емкостная компенсация индуктивного сопротивления линий электрических сетей – эффективное средство повышения их пропускной способности.
2. Управляемые шунтирующие реакторы повышают эффективность продольной компенсации.
3. Послеаварийная продольная компенсация является эффективным средством повышения динамической и статической устойчивости систем передачи в послеаварийном режиме.

## ЛИТЕРАТУРА

1. П о с п е л о в, Г. Е. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередач / Г. Е. Поспелов. – Минск: Вышэйш. шк., 1967.
2. К о щ е в, Л. А. Об эффективности применения управляющих устройств в электрической сети / Л. А. Кошчев, В. А. Шлайфштейн // Электрические станции. – 2005. – № 12. – С. 30–38.
3. А л е к с а н д р о в, Г. Н. Об эффективности применения компенсирующих устройств на линиях электропередачи / Г. Н. Александров // Электричество. – 2005. – № 4. – С. 62–67.
4. П о с п е л о в, Г. Е. Эффективность компенсирующих устройств для управления параметрами и режимами электрических сетей и их регулирование / Г. Е. Поспелов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2007. – № 4. – С. 5–12.
5. Л е Т х а н ь Б а к. Сравнение технико-экономических показателей неуправляемых реакторов с установками продольной емкостной компенсации и управляемых шунтирующих реакторов на дальних линиях электропередачи / Ле Тхань Бак // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2008. – № 4. – С. 28–33.
6. Ф е д о р о в а, И. А. Влияние активных потерь в линии передачи на эффективность последовательной компенсации / И. А. Федорова // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1965. – № 7.
7. Д е м е н т ь е в, Ю. А. Применение управляемых статических компенсирующих устройств в электрических сетях / Ю. А. Дементьев, В. Л. Кочкин, А. Г. Мельников // Электричество. – 2003. – № 9.
8. Ф е д о р о в а, И. А. Эффективность средств повышения динамической устойчивости систем электропередач / И. А. Федорова, Г. Е. Поспелов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1990. – № 7.

Представлена кафедрой  
электрических систем

Поступила 12.12.2008