

УДК 621.3.054.42

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА
ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ
STUDY OF THE DEPENDENCE OF THE EFFICIENCY OF
LONGITUDINAL COMPENSATION**

А.С. Мензелев, И.В. Смертьева, А.И. Носова
Научный руководитель – доц. Старжинский А. Л.
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
A. Menzeleev, I. Smertieva, A. Nosova
Supervisor– A Starzhinsky, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: В статье представлены зависимости эффективности от длины линии, сопротивления генераторов и трансформаторов, что вносит значительные коррективы в применении продольной компенсации.

Abstract: The article presents the dependence of efficiency on the length of the line, resistance of generators and transformers, which makes significant adjustments in the application of longitudinal compensation.

Ключевые слова: продольная компенсация, конденсаторный пункт, сопротивление генератора, сопротивление трансформатора, натуральная мощность.

Keywords: longitudinal compensation, capacitor point, generator resistance, transformer resistance, natural power.

Введение

С целью повышения эффективности работы уже существующих линий электропередач, а также для улучшения их пропускной способности, применяют устройства продольной компенсации реактивной мощности [1]. Продольная емкостная компенсация индуктивного сопротивления воздушных линий электропередачи – одно из эффективных средств повышения пропускной способности [2]. Степенью последовательной компенсации называют отношение емкостного сопротивления последовательных конденсаторов, включенных в линию, к индуктивному сопротивлению линии. В действительности это не так.

Основной текст

Степенью последовательной компенсации называют отношение емкостного сопротивления последовательных конденсаторов, включенных в линию, к индуктивному сопротивлению линии. Эффективность последовательной конденсаторной компенсации меньше, чем величина, которой обычно характеризуют степень уменьшения реактивного сопротивления линии электропередачи – степень компенсации.

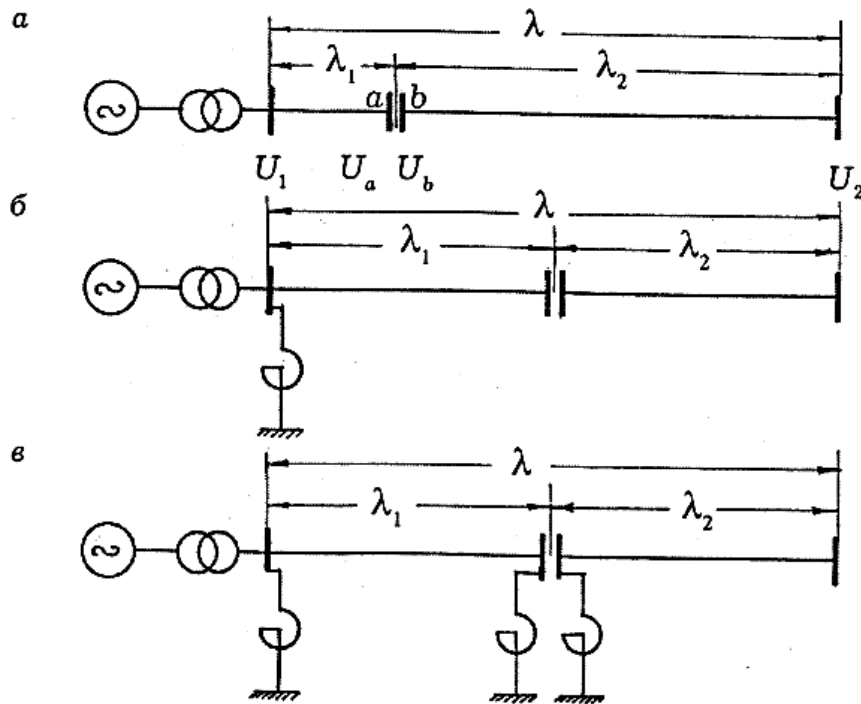


Рисунок 1 - Схемы электропередачи с продольной компенсацией

Так, если допустить, что конденсаторный пункт расположен в начале линии электропередач (ЛЭП) (Рисунок 1, а), то для ЭДС (электродвижущая сила) и передаваемой мощности получим выражения:

$$E = U_2 \left(\cos \alpha l - \frac{x_{\Gamma} - x_c}{z_B} \sin \alpha l \right) + j l_2 [(x_{\Gamma} - x_c) \cos \alpha l + z_B \sin \alpha l]; \quad (1)$$

$$P = \frac{E U_2}{(x_{\Gamma} - x_c) \cos \alpha l + z_B \sin \alpha l} \sin \theta, \quad (2)$$

Удельная передаваемая мощность:

$$p = \frac{E_*}{\frac{1}{z_B} (x_{\Gamma} - x_c) \cos \alpha l + \sin \alpha l} \sin \theta, \quad (3)$$

Здесь x_c – емкостное сопротивление конденсаторного пункта.

Знаменатель выражения (2) показывает, что эквивалентное емкостное сопротивление, вычитаемое из реактивного сопротивления системы передачи, зависит от длины линии – с увеличением длины линии оно уменьшается. При приближении расстояния к 1500 км эффективность последовательной конденсаторной компенсации сводится к нулю.

Эквивалентное емкостное сопротивление, вычитаемое из индуктивного сопротивления системы передачи, получилось $x_{c,э} = x_c k_э$, где при данном расположении конденсаторного пункта $k_э = \cos \alpha l$.

Число $k_э$, на которое нужно умножить емкостное сопротивление x_c последовательной компенсации, чтобы получить эквивалентное емкостное сопротивление, вычитаемое из индуктивного сопротивления системы,

называется коэффициентом эффективности последовательной компенсации. Если при дальности передачи $l=1000$ км емкостное сопротивление конденсаторного пункта составляет 50% от индуктивного сопротивления линии, то суммарное индуктивное сопротивление системы передачи за счет последовательной компенсации уменьшится на 25% ($k_3=0,5$).

Таким образом, индуктивное сопротивление системы передачи за счет последовательной компенсации уменьшается на величину $x_{c,э} = x_l k_3 k_c$ где x_l – индуктивное сопротивление линии; k_c – степень последовательной компенсации.

Коэффициент эффективности последовательной компенсации обусловлен свойствами ЛЭП, равномерностью распределения ее параметров и составляет вполне определенную величину для данной дальности передачи и заданного расположения компенсирующих устройств и не зависит от емкостного сопротивления конденсаторного пункта, а степень компенсации является мерой емкостного сопротивления конденсаторного пункта, выраженной в долях индуктивного сопротивления линии.

Рассмотрим случай расположения конденсаторного пункта в любой точке линии. Пользуясь уравнениями линии без потерь, найдем напряжения и токи последовательно в точках b, a, 1, считая неизвестными U_2 и I_2 :

$$U_B = U_2 \cos \lambda_2 + jI_2 z_B \sin \lambda_2 ;$$

$$I_B = I_2 \cos \lambda_2 + j \frac{U_2}{z_B} \sin \lambda_2 ;$$

$$U_a = U_B - jx_c I_B,$$

Или

$$U_a = U_2 \left(\cos \lambda_2 + \frac{x_c}{z_B} \sin \lambda_2 \right) + jI_2 (z_B \sin \lambda_2 - x_c \cos \lambda_2) ;$$

$$I_a = I_B; U_1 = U_a \cos \lambda_1 + jI_a z_B \sin \lambda_1 ; I_1 = I_a \cos \lambda_1 + j \frac{U_a}{z_B} \sin \lambda_1 ,$$

Или

$$U_1 = U_2 \left(\cos \lambda + \frac{x_c}{z_B} \sin \lambda_2 \cos \lambda_1 \right) + jI_2 (z_B \sin \lambda - x_c \cos \lambda_1 \cos \lambda_2) ;$$

$$I_1 = I_2 \left(\cos \lambda + \frac{x_c}{z_B} \sin \lambda_1 \cos \lambda_2 \right) + j \frac{U_2}{z_B} \left(\sin \lambda + \frac{x_c}{z_B} \sin \lambda_1 \sin \lambda_2 \right) ,$$

В этих выражениях λ_1 и λ_2 – волновые длины участков линии, λ – волновая длина всей линии.

ЭДС находим по выражению $E = U_1 + jx_\Gamma I_1$ или:

$$E = U_2 \left(\cos \lambda - \frac{x_c}{z_B} \sin \lambda + \frac{x_c}{z_B} \sin \lambda_2 \cos \lambda_1 - \frac{x_\Gamma x_c}{z_B z_B} \sin \lambda_1 \sin \lambda_2 \right) + \quad ((4)$$

$$+ jI_2 (z_B \sin \lambda + x_\Gamma \cos \lambda - x_\Gamma \cos \lambda_1 \cos \lambda_2 + \frac{x_c}{z_B} x_\Gamma \sin \lambda_1 \sin \lambda_2),$$

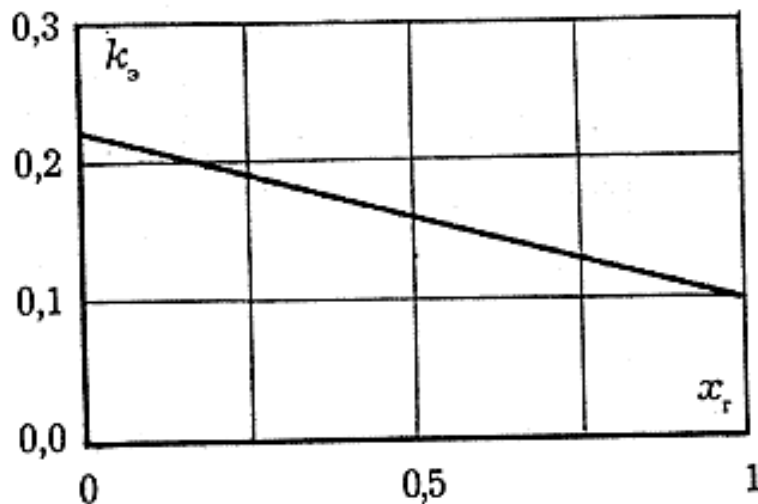


Рисунок 2 - Зависимость коэффициента эффективности продольной компенсации от сопротивления генераторов

Передаваемую мощность, основываясь на векторной диаграмме, можно представить в следующем виде:

$$P = \frac{EU_2 \sin \theta}{x_g \cos \lambda + z_B \sin \lambda - x_c \cos \lambda_1 \cos \lambda_2 + \frac{x_c}{z_B} x_g \sin \lambda_1 \cos \lambda_2}, \quad ((5))$$

Здесь E и U_2 – линейные значения.

Из выражения (5) следует, что при одном и том же сопротивлении конденсаторных пунктов x_0 компенсируемое индуктивное сопротивление линии прямо пропорционально коэффициенту эффективности последовательной компенсации:

$$k_э = \cos \lambda_1 \cos \lambda_2 - \frac{x_g}{z_B} \sin \lambda_1 \cos \lambda_2, \quad ((6))$$

Из выражения (6) видно, что $k_э$ зависит от сопротивления генераторов и трансформаторов; только при расположении конденсаторного пункта в начале линии $k_э$ не зависит от сопротивления генераторов и трансформаторов (Рисунок 3).

При расположении конденсаторного пункта в середине линии (Рисунок 1, а), когда $\lambda_1 = \lambda_2 = \frac{1}{2}\lambda$, коэффициент эффективности последовательной компенсации представится выражением:

$$k_э = \cos \frac{\alpha l}{2} \left(\cos \frac{\alpha l}{2} - \frac{x_g}{z_B} \sin \frac{\alpha l}{2} \right), \quad ((7))$$

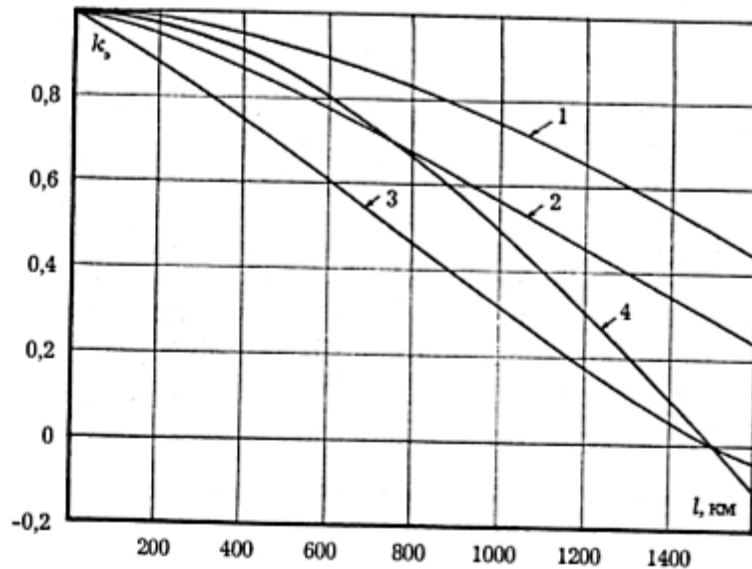


Рисунок 3 - Зависимости коэффициента эффективности продольной компенсации от дальности

Кривые 1, 2 и 3 (Рисунок 3) построенные по выражению (7) соответственно для $x_r=0$, $x_r=0,42$ и $x_r=1,0$, показывают, что с увеличением расстояния коэффициент эффективности последовательной компенсации быстро уменьшается. Кривая 4 соответствует расположению конденсаторного пункта в начале ЛЭП (Рисунок 1, а). Расположение конденсаторного пункта, соответствующее максимальной эффективности последовательной компенсации, определяется значением λ_{1M} из уравнения:

$$\frac{dk_{\text{э}}}{d\lambda_1} = 0$$

Или после преобразований:

$$\sin(\lambda - 2\lambda_{1M}) - \frac{x_r}{z_B} \cos(\lambda - 2\lambda_{1M}) = 0,$$

Решение этого уравнения дает:

$$\lambda_{1M} = \frac{1}{2} \left[\lambda - \arctg \frac{x_r}{z_B} \right], \quad (8)$$

где λ_{1M} — значение λ_1 , определяющее максимальный коэффициент эффективности.

Формула (8) показывает, что λ_{1M} зависит от длины линии и от реактивного сопротивления генераторов и трансформаторов. Соотношения (2), (4), (5), а также кривые рисунка 5 показывают, что в действительности последовательная конденсаторная компенсация как средство повышения дальности передачи менее эффективна, чем принято иногда считать. Однако она все же дает возможность значительно расширять пределы передачи электроэнергии переменным током.

Заключение

Можно сделать вывод, что при повышении пропускной способности ЛЭП, при увеличении натуральной мощности ЛЭП, эффективность применения продольной компенсации незначительно снижается. Однако, как и говорилось в теории, при увеличении сопротивления генератора коэффициент эффективности продольной компенсации резко снижается.

Литература

1. Продольная компенсация реактивной мощности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electricalschool.info/sety/1809-prodolnaja-kompensacija-reaktivnoj.html>
2. Исследование влияния установки продольной компенсации на режимы дальней электропередачи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://web.snauka.ru/issues/2016/06/69596>. – Дата доступа: 15.04.2021.