

## СТЕПЕНЬ КОМПЕНСАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДЛИННОЙ ЛИНИИ

О. Б. ТОЛПЫГО

(Представлено научным семинаром энергетического факультета)

Компенсация индуктивного сопротивления и емкостной проводимости длинной линии производится включением в линию реактивных элементов: емкости, индуктивности или и того и другого одновременно. Так как режим работы электропередачи определяется работой всех элементов, в нее входящих, то включение компенсирующих устройств внесет изменение в режим работы электропередачи, изменит ее свойства в целом и в первую очередь изменит свойства самой линии, т. е. ее постоянные  $A, B, C, D$ . Отражение новых свойств линии, приобретенных при компенсации, выразится в изменении коэффициентов. Степень изменения коэффициентов будет зависеть от мощности КУ и места включения их в линию.

Степень изменения параметров линии, т. е. в основном ее реактивного сопротивления и реактивной проводимости, принято характеризовать степенью компенсации. Понятие „степень компенсации“ надо уточнить, так как часто это понятие толкуют, на наш взгляд, неправильно. Г. Е. Поспелов [1] утверждает, что „мерой последовательной компенсации служит степень компенсации  $k_c$ , определяемая как отношение включенного последовательно в линию емкостного сопротивления к индуктивному сопротив-

лению линии  $x_L$   $k_c = \frac{x_c}{x_L}$  (1). Там же степень параллельной компенсации

определяется как отношение проводимости включенного в линию реактора к емкостной проводимости линии

$$k_L = \frac{b_L}{b_c} \quad (2)$$

Против такого определения степени компенсации возникают следующие возражения:

а) степень компенсации зависит от места расположения КУ на линии, чего формулы (1, 2) не учитывают;

б) определение коэффициента компенсации для цепей, имеющих распределенные параметры (линии) и сосредоточенные индуктивности и емкости (КУ), по вышеприведенным формулам в принципе неверно, т. к. они не отражают специфические особенности сочетания распределенных и сосредоточенных параметров компенсированной линии. Компенсированную линию можно представить как цепочку четырехполюсников. Обобщенные параметры компенсированной линии найдутся как

$$\begin{vmatrix} A_e & B_e \\ C_e & D_e \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{vmatrix} \quad (3)$$

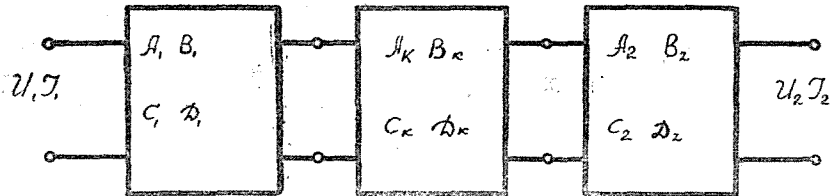
Поскольку  $B_e$  отражает собою реактивное сопротивление компенсированной линии, а  $C_e$ —реактивную проводимость ее, то под степенью компенсации следует понимать относительное изменение соответствующего параметра компенсированной линии по сравнению с соответствующим параметром некомпенсированной линии:

степень продольной компенсации

$$k_c = \frac{B - B_e}{B}, \quad (4)$$

степень поперечной компенсации

$$k_L = \frac{C - C_e}{C}.$$



Фиг. 1. Схема замещения длинной линии.

Так как коэффициенты  $C_e$ ,  $B_e$  зависят от вида и места включения компенсирующих устройств на линии, то следует ожидать изменения величины степени компенсации от вышеупомянутых причин.

При продольной одиночной компенсации степень компенсации в зависимости от места включения емкости в линию определяется формулой (при  $r_p = 0$ ,  $g_o = 0$ )

$$k_c = \frac{x_c}{(\operatorname{tg} \lambda_1 + \operatorname{tg} \lambda_2) Z_0} \quad [2]$$

или в относительных единицах

$$k_c = \frac{x_c}{\operatorname{tg} \lambda_1 + \operatorname{tg} \lambda_2}.$$

Легко доказать  $\left( \frac{\partial k_c}{\partial \lambda_1} = 0 \right)$ , что наибольшая степень компенсации при

$x_c = \text{const}$  получается при расположении емкости в середине линии.

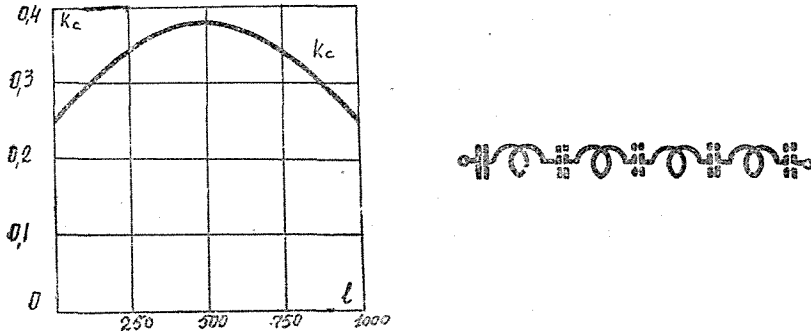
Полагая  $x_c$  постоянным, получим следующую зависимость степени продольной компенсации от места положения емкостного КУ на линии (длина линии  $l = 1000$  км  $x_c = -j 0,433$ ).

Как видно из фиг. 2, в зависимости от расположения КУ на линии степень продольной компенсации наименьшая при расположении емкостного КУ по концам линии и наибольшая при включении его в середине линии.

Кстати отметим, что если придерживаться методики определения степени компенсации по формуле  $k_c = \frac{x_c}{x_d}$ , то  $k_c = 40\%$  для любого положения КУ на линии.

На фиг. 3 приведены изменения сопротивления емкостного КУ при соблюдении степени продольной компенсации постоянной при любом расположении КУ на линии.

Из кривой следует, что для соблюдения одной и той же степени продольной компенсации при различном расположении емкостного КУ на линии наибольшая мощность требуется при конечном расположении КУ.



Фиг. 2. Кривая зависимость продольной степени компенсации от места включения емкостного компенсирующего устройства.

При поперечной компенсации выражение степени поперечной компенсации может быть определено из формулы 3, помня, что

$$A_k = D_k = 1, \quad B_k = 0, \quad C_k = -jy_k,$$

где  $-jy_k$  — проводимость реактора.

Поэтому

$$\begin{vmatrix} A_e & B_e \\ C_e & D_e \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -jy_k & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} A_1 A_2 - jA_2 B_1 y_k + B_1 C_2 & A_1 B_2 - jB_1 B_2 y_k + B_1 D_2 \\ A_2 C_1 - jA_2 D_1 y_k + C_2 D_1 & C_1 B_2 - jB_2 D_1 y_k + D_1 D_2 \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Откуда

$$k_L = \frac{C - C_e}{C} = \frac{A_2 D_1 y_k}{A_2 C_1 + C_2 D_1}. \quad (7)$$

Но

$$A_2 = \cos \lambda_2, \quad C_2 = j \frac{\sin \lambda_2}{Z_b}. \quad (8)$$

$$C_1 = j \frac{\sin \lambda_1}{Z_s}, \quad D_1 = \cos \lambda_1$$

и

$$k_L = \frac{y_k Z_s}{\operatorname{tg} \lambda_1 + \operatorname{tg} \lambda_2} \quad (9)$$

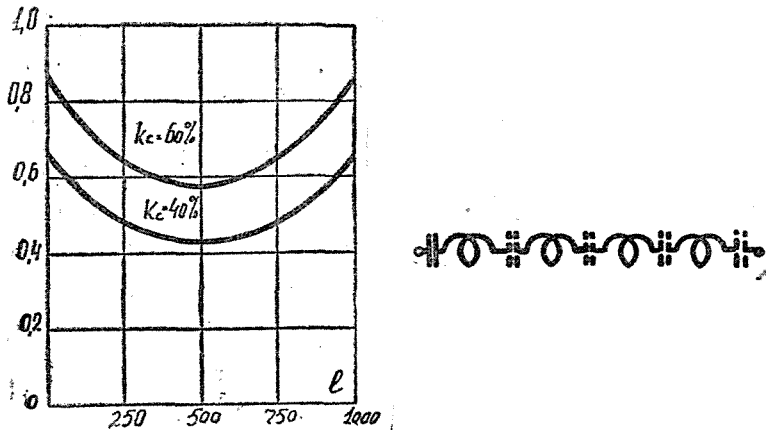
или в относительных единицах ( $Z_s = 1$ )

$$k_L = \frac{y_k}{\operatorname{tg} \lambda_1 + \operatorname{tg} \lambda_2}. \quad (10)$$

Следовательно, степень поперечной компенсации определяется выражением, аналогичным выражению степени продольной компенсации и тем самым изменение степени поперечной компенсации от положения реактора на линии может быть представлено тем же графиком (фиг. 3).

Итак, степенью компенсации является отношение изменения коэффициента  $B_e$  компенсированной линии  $K$  к коэффициенту  $B$  некомпенсирован-

ной линии для продольной компенсации и соответствующее отношение коэффициентов  $C$  для поперечной компенсации.



Фиг. 3. Кривые изменения реактивного сопротивления емкостного компенсирующего устройства от положения его на линии.

Но включение только продольного КУ вызывает изменение не только коэффициента  $B$ , отражающего индуктивное сопротивление линии, но и коэффициента  $C$ , отражающего емкостную проводимость линии.

На самом деле, для продольной компенсации (6) следует

$$\dot{C}_e = C - jx_c \dot{C}_1 \dot{C}_2$$

или

$$\dot{C}_e = j(C + x_c C_1 C_2). \quad (11)$$

Из последнего выражения можно сделать вывод, что продольная емкостная компенсация, уменьшая коэффициент  $B$ , т. е. индуктивное сопротивление линии, одновременно увеличивает коэффициент  $C$ , иными словами ее емкостную проводимость, а потому ток холостого хода линии с продольной компенсацией будет больше тока холостого хода некомпенсированной линии

$$I_{10e} = U_2 C_e > I_{10} = U_2 C, \quad \text{т.к. } C_e > C. \quad (12)$$

Направляется заключение, что продольная емкостная компенсация вызывает отрицательную компенсацию параметра  $C$ , т. е. увеличение емкостной проводимости, причем такая степень компенсации (обозначим ее  $k'_L$ ) будет равна

$$k'_L = \left| \frac{\dot{C} - \dot{C}_e}{\dot{C}} \right| = \left| \frac{x_c C_1 C_2}{C} \right|. \quad (13)$$

Преобразуем выражение (13) и получим, что

$$k'_L = \frac{x_c}{Z_0(\text{ctg}\lambda_1 + \text{ctg}\lambda_2)} \quad (14)$$

или в относительных единицах

$$k'_L = \frac{x_c}{\text{ctg}\lambda_1 + \text{ctg}\lambda_2}. \quad (15)$$

Анализ выражения (15) позволяет сделать заключение, что  $k'_L$  будет максимальным при расположении емкости в середине линии  $\left( \lambda_1 = \lambda_2 = \frac{\lambda}{2} \right)$

$$k'_L = \frac{x_c}{2 \text{ctg} \frac{\lambda}{2}}, \quad (16)$$

наименьшее значение  $k'_L$  — при расположении емкостного КУ на концах линии ( $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = \lambda$  или  $\lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = 0$ ), т.к. в этом случае

$$k'_L = \frac{x_c}{\text{ctg}0^\circ + \text{ctg}\lambda} = 0. \quad (17)$$

Применив аналогичные рассуждения только для поперечной компенсации, получим, что коэффициент  $\dot{B}$  такой компенсированной линии больше коэффициента  $B$  некомпенсированной линии. Из выражения (6) следует, что

$$\dot{B}_e = \dot{B} - j\dot{B}_1 \dot{B}_2 y_k \quad (18)$$

или

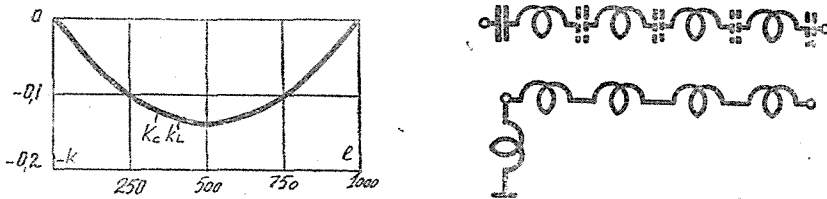
$$\dot{B}_e = j(B + B_1 B_2 y_k),$$

откуда необходимо сделать вывод, что применение поперечной компенсации увеличивает параметр  $B$  компенсированной линии. Такая отрицательная степень компенсации параметра  $B$  (обозначим ее  $k'_c$ ) будет равна

$$k'_c = \left| \frac{B - \dot{B}_e}{\dot{B}} \right| = \left| \frac{y_k Z_0}{\text{ctg}\lambda_1 + \text{ctg}\lambda_2} \right| \quad (19)$$

или в относительных единицах

$$k'_c = \frac{y_k}{\text{ctg}\lambda_1 + \text{ctg}\lambda_2}. \quad (20)$$

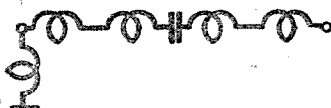
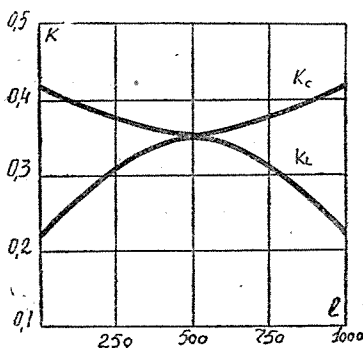


Фиг. 4. Кривая зависимостей отрицательных степеней компенсации от положения компенсирующих устройств на линии.

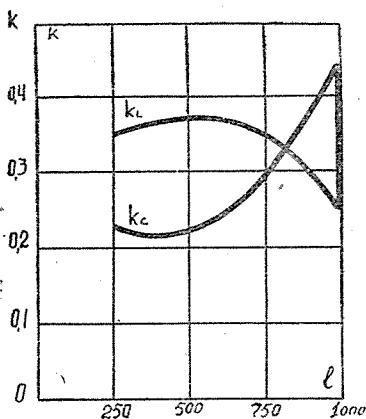
На фиг. 4 приведены график и значения коэффициентов  $k'_L$  и  $k'_c$  для линии  $l = 1000$  км. При постоянном реактивном сопротивлении  $x_c$  для случая продольной компенсации и при постоянной реактивной проводимости КУ для случая поперечной компенсации в зависимости от места включения КУ на линии. Из выражений (15) и (20) следует, что увеличение реактивного сопротивления емкостного КУ или увеличения реактивной проводимости поперечного КУ сопровождается соответствующим увеличением емкостной проводимости или индуктивного сопротивления линии. При совместном применении продольных и поперечных (одиночных) КУ степень компенсации зависит не только от величины реактивного сопротивления или реактивной проводимости КУ и места их включения в линию, но и от взаимного расположения продольного и поперечного КУ, что видно из фиг. 5 и 6, где представлены зависимости степеней компенсации для постоянного расположения емкостного КУ и различном положении на линии реактора.

Легко видеть, что характер изменения степеней компенсации отличается от схем только с одним КУ, продольным или поперечным. Например, для схем (фиг. 5) степень продольной компенсации изменяется не столь значительно с перемещением реактора к концу линии. Для схем с продольным КУ в конце линии (фиг. 6) степени компенсации  $k'_L$  и  $k'_c$  с пере-

мещением реактора вдоль линии изменяются взаимнопротивоположно. Причем характерно, что перемещение реактора за сосредоточенное емкостное сопротивление характеризуется резким изменением степени компенсации:  $k_c$  уменьшается в 1,75 раза, а  $k_L$  во столько же увеличивается. Интересен еще один вопрос, как будет изменяться степень компенсации при дроблении компенсирующего устройства при условии, что общее их сопротивление или проводимость будут оставаться постоянным. Фиг. 7 и 8 дают ответ на этот вопрос.



Фиг. 5



Фиг. 6

Фиг. 5, 6. Кривая зависимости степеней компенсации от взаимного расположения компенсирующих устройств.

Изменение степени компенсации с перемещением одного КУ при раздробленном КУ другого вида не так значительно, как в случае одиночных КУ, и надо полагать, что при большом числе КУ, т. е. при размещении их через небольшие расстояния, степень компенсации будет оставаться постоянной.

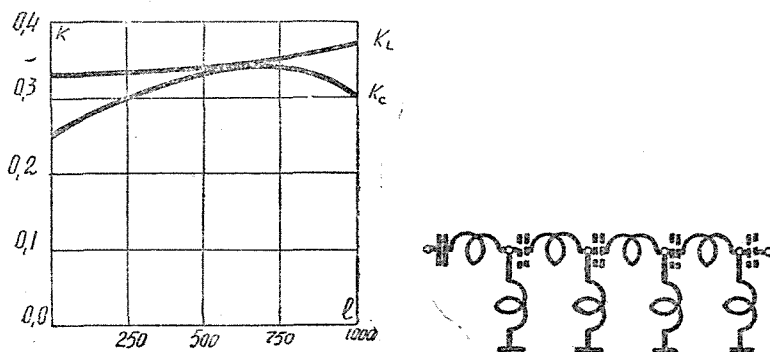
Расчеты степени компенсации, проведенные для большого числа схем, позволяют сделать следующие выводы:

1. Определение степени компенсации простым отношением величины сопротивления (проводимости) КУ к сопротивлению (проводимости) линии неправильно, т. к. не учитываются при этом способе сочетание распределенных (линия) и сосредоточенных (компенсирующие устройства) постоянных, место включения КУ на линии и их взаимное расположение.

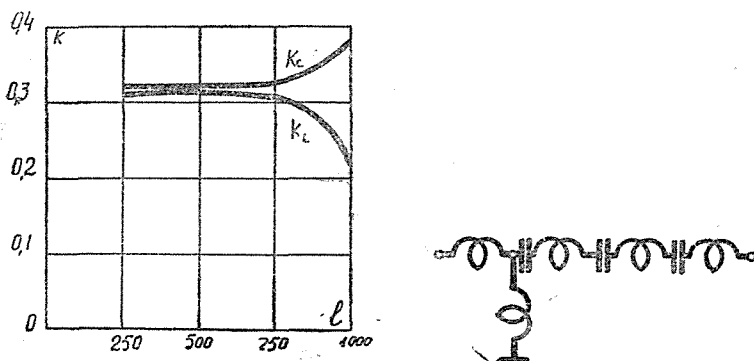
2. Определение степени компенсации необходимо производить путем сравнения соответствующих параметров компенсированной и некомпенсированной линий

$$k_c = \frac{B - B_e}{B}, \quad k_L = \frac{C - C_e}{C}$$

3. При одинаковом сопротивлении (проводимости) КУ степень компенсации зависит от места включения КУ на линии и взаимного расположения компенсирующих устройств.



Фиг. 7



Фиг. 8.

Фиг. 7, 8. Кривые зависимостей степеней компенсации в зависимости от положения компенсирующих устройств на линии.

4. Применение только продольного КУ вызывает увеличение емкостной проводимости линии, а применение только поперечного КУ — увеличение индуктивного сопротивления линии.

5. Дробление компенсирующего устройства одного вида при различном размещении КУ другого вида вызывает незначительное изменение степени компенсации.

6. При применении раздробленных КУ для соблюдения постоянства степени компенсации в зависимости от положения КУ на линии требуется мощность КУ меньшая, чем при применении одиночных КУ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Поспелов Г. Е. О предельной компенсации параметров электропередачи. Электричество, 2, 1952.
2. Атабеков Г. И. Вопросы релейной защиты линий электропередач с продольной емкостной компенсацией. Электричество 8, 1953.