

А.А. КУВШИНОВ

В.В. ВАХНИНА

А.Н. ЧЕРНЕНКО

КОМПЕНСИРОВАННАЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНАЯ ЛИНИЯ С ПОВЫШЕННОЙ НАТУРАЛЬНОЙ МОЩНОСТЬЮ

COMPENSATED DISTRIBUTION LINE WITH INCREASED NATURAL LOADING

Рассмотрены два способа увеличения натуральной мощности распределительной линии с потерями до уровня пропускной способности, ограниченной экономической плотностью тока или допустимой по нагреву плотностью тока в фазных проводках. Показано, что поперечная емкостная компенсация не накладывает технических ограничений на возможность увеличения натуральной мощности распределительной линии в отличие от продольной емкостной компенсации, возможности которой ограничиваются активным сопротивлением фазных проводков. Определена степень поперечной емкостной компенсации, необходимой для увеличения натуральной мощности распределительной линии до уровня пропускной способности, ограниченной экономической плотностью тока или допустимой по нагреву плотностью тока в фазных проводках.

Ключевые слова: распределительная линия, натуральная мощность, пропускная способность, продольная и поперечная емкостная компенсация, степень поперечной емкостной компенсации

Натуральная мощность распределительной линии с потерями. Режим передачи натуральной мощности является наиболее благоприятным для транзита электроэнергии переменного тока, поскольку в силу сбалансированности электромагнитного поля линия не потребляет и не генерирует реактивную мощность, а потери активной мощности минимальны [1]. Для магистральных электропередач с номинальным напряжением 220 кВ и выше натуральная мощность превышает значения, определяемые экономической плотностью тока [2]. Поэтому при номинальных нагрузках возможна работа магистральных линий в режиме, близком к натуральному.

Для линии без потерь величина натуральной мощности определяется простым выражением [2,3]:

$$P_{\text{нат}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{Z_B}, \quad (1)$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение (межфазное) линии; $Z_B = \sqrt{x_0/b_0}$ – волновое сопротивление линии без потерь; x_0 , b_0 – погонное индуктивное сопротив-

ление и погонная емкостная проводимость линии соответственно, величину которых можно оценить с помощью эмпирических выражений

$$x_0 = 0,1445 \cdot \lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{гп}}}, \quad \text{Ом/км}, \quad (2)$$

$$b_0 = \frac{7,54}{\lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{гп}}}} \cdot 10^{-6}, \quad \text{См/км}, \quad (3)$$

где $D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}}$ – среднегеометрическое расстояние между фазными проводками; D_{12} , D_{13} , D_{23} – расстояние между проводками первой, второй и третьей фаз; $r_{\text{гп}} = (1,5 + 1,2) \cdot \sqrt{F/\pi}$ – фактический радиус многопроволочных проводков; F – суммарное сечение токоведущей и стальной частей фазного провода.

Выражения (2) и (3) позволяют определить величину волнового сопротивления по известным геометрическим размерам линии

$$Z_B = 138,44 \cdot \lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{гп}}}. \quad (4)$$

Анализируя выражения (1), (4), можно отметить, что наиболее рациональным путем повышения натуральной мощности может служить искусственное изменение погонных параметров (x_0, b_0), которое возможно без реконструкции линии, связанной с заменой проводов, изоляторов, опор.

В распределительных сетях с номинальным напряжением 6–110 кВ согласование передаваемой мощности с натуральной мощностью линии не считается необходимым. Поэтому мощность магнитного поля распределительной линии многократно превышает мощность электрического поля. В результате распределительная линия является таким же потребителем реактивной мощности, как и большинство электроприемников [4].

Существуют два характерных значения плотности тока в фазных проводах распределительной линии:

- допустимая по нагреву плотность тока $J_{(0t)}$, величина которой обычно не превышает $J_{(0t)} = 5 \text{ А/мм}^2$;
- экономическая плотность тока $J_{\text{э}}$, при которой обеспечивается минимум приведенных затрат на содержание и эксплуатацию линии. Величина $J_{\text{э}}$ зависит от района расположения линии и количества часов использования максимума нагрузки. Для предварительных оценок можно использовать среднее значение $J_{\text{э}} = 1 \text{ А/мм}^2$ [5].

Создание натурального режима работы распределительной линии является обязательным условием снижения потребляемой от центра питания полной мощности до уровня только активной составляющей, которое будет сопровождаться также снижением потерь активной мощности. Однако для этого потребуется искусственное увеличение натуральной мощности распределительной линии либо до значения

$$P_{\text{НАТ}} = P_{(\text{э})} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot (F \cdot J_{\text{э}}), \quad (5)$$

$$P_{\text{НАТ}} = P_{(0t)} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot (F \cdot J_{0t}), \quad (6)$$

где $P_{(\text{э})}$ – пропускная способность распределительной линии, ограниченная экономической плотностью тока; $P_{(0t)}$ – пропускная способность распределительной линии, ограниченная допустимой по нагреву плотностью тока.

Количественные значения натуральной мощности $P_{\text{НАТ}}$ и пропускной способности $P_{(\text{э})}, P_{(0t)}$ распределительных линий различных классов напряжения, определенные по выражениям (1), (5) и (6), представлены в табл. 1.

Пропускная способность $P_{(\text{э})}$ определена для типичного значения экономической плотности тока $I_{\text{э}} = 1 \text{ А/мм}^2$, а пропускная способность $P_{(0t)}$ – для значений плотности тока $J_{(0t)}$, соответствующих длительно допустимому току фазного провода соответствующей марки и сечения.

В табл. 2 представлены значения пропускной способности распределительных линий 6–110 кВ при экономической и допустимой по нагреву плотности тока в фазных проводах, выраженные в долях натуральной мощности:

$$P_{(\text{э})}^* = P_{(\text{э})} / P_{\text{НАТ}} \text{ и } P_{(0t)}^* = P_{(0t)} / P_{\text{НАТ}}$$

Как видно, для распределительных линий с номинальным напряжением 6–35 кВ режимы передачи мощности $P_{(\text{э})}$ и $P_{(0t)}$ весьма далеки от режима передачи натуральной мощности. Только для распределительных линий класса 110 кВ натуральный режим

Таблица 1

Основные параметры и режимные характеристики распределительных линий

| $U_{\text{НОМ}}, \text{кВ}$ | Марка провода | $X_0, \text{Ом/км}$ | $B_0 \times 10^{-6}, \text{См/км}$ | q | $Z_B, \text{Ом}$ | $J_{(0t)}, \text{А/мм}^2$ | $P_{\text{НАТ}}, \text{МВт}$ | $P_{(\text{э})}, \text{МВт}$ | $P_{(0t)}, \text{МВт}$ |
|-----------------------------|---------------|---------------------|------------------------------------|------|------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|
| 6 | АС-35 | 0,457 | 2,38 | 0,45 | 438 | 5,0 | 0,082 | 0,364 | 1,82 |
| 10 | АС-50 | 0,453 | 2,46 | 0,58 | 429 | 4,2 | 0,283 | 0,866 | 3,64 |
| 20 | АС-70 | 0,445 | 2,54 | 1,04 | 419 | 3,8 | 0,955 | 2,43 | 9,234 |
| 35 | АС-95 | 0,435 | 2,61 | 1,42 | 409 | 3,5 | 2,995 | 5,76 | 20,16 |
| 110 | АС-150 | 0,42 | 2,7 | 2,12 | 395 | 2,97 | 30,6 | 28,58 | 85 |
| 110 | АС-240 | 0,406 | 2,802 | 3,35 | 380 | 2,52 | 31,84 | 45,73 | 115,24 |

Таблица 2

Пропускная способность распределительных линий в долях натуральной мощности

| $U_{\text{НОМ}}, \text{кВ}$ | 6 | 10 | 20 | 35 | 110(240) | 110(150) |
|-----------------------------|------|-------|------|------|----------|----------|
| $P_{(\text{э})}^*$ | 4,4 | 3,72 | 2,55 | 1,92 | 1,44 | 0,934 |
| $P_{(0t)}^*$ | 22,2 | 15,26 | 9,67 | 6,73 | 3,62 | 2,78 |

возможен при работе с экономической плотностью тока.

В общем случае, волновое сопротивление однородной линии с потерями является комплексной величиной и определяется выражением

$$\dot{Z}_{B(П)} = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jb_0}},$$

где r_0 – погонное активное сопротивление линии; g_0 – погонная активная проводимость линии.

Для распределительных линий с номинальным напряжением 6÷110 кВ активной проводимостью можно пренебречь и принять $g_0 = 0$. Тогда волновое сопротивление линии с потерями будет определяться комплексной величиной

$$\dot{Z}_{B(П)} = Z_B \cdot \sqrt{\frac{q-j}{q}}, \quad (7)$$

где Z_B – волновое сопротивление линии без потерь (действительная величина); $q = x_0/r_0$ – добротность линии без емкостной проводимости.

Используя известное соотношение между квадратным корнем из комплексного числа и алгебраической формой записи комплексного числа [6]:

$$\sqrt{q-j} = \sqrt{\frac{\sqrt{q^2+1}+q}{2}} - j \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{q^2+1}-q}{2}}, \quad (8)$$

выражение (7) также нетрудно представить в алгебраической форме

$$\dot{Z}_{B(П)} = \frac{Z_B}{\sqrt{2}} \cdot \left[\sqrt{\sqrt{q^2+1}+1} - j\sqrt{\sqrt{q^2+1}-1} \right] = Z_{B(П)} \cdot e^{j\varphi_{B(П)}}, \quad (9)$$

позволяющей определить модуль $Z_{B(П)}$ и аргумент $\varphi_{B(П)}$ комплекса волнового сопротивления распределительной линии с потерями

$$Z_{B(П)} = Z_B \cdot \sqrt[4]{q^2+1}, \quad (10)$$

$$\varphi_{B(П)} = \arctg \sqrt{\frac{\sqrt{q^2+1}-1}{\sqrt{q^2+1}+1}}. \quad (11)$$

Тогда натуральная мощность распределенной линии с потерями с учетом (1) и (10) будет определяться величиной

$$P_{НАТ(П)} = \frac{U_{НОМ}^2}{Z_{B(П)}} = \frac{U_{НОМ}^2}{Z_B} \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{q^2+1}} = \frac{P_{НАТ}}{\sqrt[4]{q^2+1}}. \quad (12)$$

В табл. 3 представлены количественные значения аргумента и модуля $Z_{B(П)}^* = Z_{B(П)}/Z_B$ волнового сопротивления, а также натуральной мощности $P_{НАТ(П)}^* = P_{НАТ(П)}/P_{НАТ}$ вычисленные с помощью выражений (10)–(12) для возможного диапазона значений добротности $q=0,5÷5,0$.

Как видно, в диапазоне значений $q=0,5÷3,0$, характерных для распределительных линий с номинальным напряжением 6÷110 кВ (см. табл. 1), волновое сопротивление и натуральная мощность существенно изменяются – на 47 и 28 % соответственно. При увеличении добротности линии (уменьшении погонного активного сопротивления) волновое сопротивление уменьшается, а натуральная мощность линии увеличивается.

При $q \geq 3,0$, характерных для магистральных линий с номинальным напряжением 220 кВ и выше, натуральная мощность практически не зависит от погонного активного сопротивления и может определяться с помощью выражения (1) как натуральная мощность линии без потерь.

Сравнительный анализ данных табл. 1 и 3 показывает, что увеличение только добротности недостаточно для увеличения натуральной мощности до уровней, определяемых выражениями (5), (6). Это объясняется тем, что диапазон изменения добротности достаточно узкий, а увеличение сверх значения $q=3$ не рационально. Кроме того, для увеличения добротности необходима полная замена проводов линии, т.е. реконструкция распределительной линии [7]. Однако такое трудоемкое и затратное мероприятие принесет весьма ограниченный технический эффект в виде увеличения натуральной мощности не более чем на 30 %.

Увеличение номинального напряжения распределительной линии, как показывают выражения (12), (5) и (6), сопровождается опережающим ростом натуральной мощности по сравнению с пропускной

Таблица 3

Волновое сопротивление и натуральная мощность распределительных линий с потерями

| q | 0,5 | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|
| $Z_{B(П)}^*$ | 1,5 | 1,19 | 1,06 | 1,03 | 1,02 | 1,01 |
| $\varphi_{B(П)}$ | 32 | 22 | 13 | 9 | 7 | 6 |
| $P_{НАТ(П)}^*$ | 0,67 | 0,84 | 0,95 | 0,97 | 0,98 | 0,99 |

способностью, ограниченной экономической или допустимой по нагреву плотностью тока. Но только при $U_{НОМ} = 110$ кВ, как видно из табл. 1, начинает выполняться условие (5) и появляется возможность работы в натуральном режиме. Однако увеличение номинального напряжения означает полную реконструкцию линии с заменой не только проводов, но и изоляторов и опор.

Анализ (12) показывает еще одну возможность увеличения натуральной мощности распределительной линии, связанную с многократным уменьшением волнового сопротивления. Поскольку номинальное напряжение при этом не изменяется, то уменьшение волнового сопротивления способно обеспечить существование натурального режима для любой распределительной линии 6÷110 кВ.

Уменьшить волновое сопротивление, как видно из выражения (7), можно либо путем уменьшения погонного индуктивного сопротивления, либо путем увеличения погонной емкостной проводимости. В первом случае должна осуществляться продольная емкостная компенсация, а во втором – поперечная емкостная компенсация [2,3].

Продольная емкостная компенсация. На рис. 1 показан фрагмент распределительной сети радиальной топологии с центром питания (ЦП). Продольная емкостная компенсация осуществляется путем включения конденсаторных батарей в расщечку фазных проводов распределительной линии, как показано на рис. 1.

Такие установки продольной компенсации (УПК) получили применение в электрических сетях практически всех напряжений от 6 до 500 кВ включительно [3,8,9]. При продольной емкостной компенсации волновое сопротивление распределительной линии будет уменьшаться в соответствии с выражением

$$\dot{Z}_{B(L)} = \sqrt{\frac{(r_0 + jx_0) \cdot l - jx_c}{jb_0 \cdot l}}, \quad (13)$$

где r_0 – погонное активное сопротивление линии; x_0 , b_0 – погонные индуктивное сопротивление и погонная емкостная проводимость линии соответственно; $x_c = 1/\omega C$, C – емкостное сопротивление и емкость УПК соответственно; ω – угловая частота питающего напряжения; l – длина распределительной линии.

Для упрощения дальнейшего анализа выражение (13) целесообразно преобразовать к виду

$$\dot{Z}_{B(L)} = Z_B \cdot \sqrt{\frac{(1 - K_L) \cdot q - j}{q}}, \quad (14)$$

где $K_L = x_c/x_0 \cdot l = x_c/x_L$ – степень продольной компенсации; $x_L = x_0 \cdot l$ – индуктивное сопротивление распределительной линии.

Развернутая алгебраическая форма записи комплексной величины (14), полученная с помощью соотношений [6]

$$\dot{Z}_{B(L)} = \frac{Z_B}{\sqrt{2}} \cdot \left[\sqrt{\sqrt{q^{-2} + (1 - K_L)^2} + (1 - K_L)} - j \sqrt{\sqrt{q^{-2} + (1 - K_L)^2} - (1 - K_L)} \right],$$

позволяет определить модуль комплекса волнового сопротивления разделительной линии с потерями при включении УПК

$$Z_{B(L)} = Z_B \cdot \sqrt[4]{q^{-2} + (1 - K_L)^2} \quad (15)$$

и натуральную мощность

$$P_{НАТ(L)} = \frac{U_{НОМ}^2}{Z_{B(L)}} = \frac{P_{НАТ}}{\sqrt[4]{q^{-2} + (1 - K_L)^2}}. \quad (16)$$

Поскольку при осуществлении продольной емкостной компенсации необходимо выполнять условие $x_c \leq x_0 \cdot l$, то диапазон возможных значений степени продольной компенсации должен составлять $0 \leq K_L \leq 1,0$.

В частности, при $K_L = 0$, т.е. при шунтировании УПК продольная емкостная компенсация отсутствует, а при $K_L = 1,0$, т.е. при полной компенсации индуктивного сопротивления распределительной линии, модуль комплекса волнового сопротивления принимает минимально возможное значение

$$Z_{B(L)min} = \frac{Z_B}{\sqrt{q}},$$

а натуральная мощность увеличивается до максимально возможного значения

$$P_{НАТ(L)max} = P_{НАТ} \cdot \sqrt{q}.$$

Таким образом, даже при полной компенсации индуктивного сопротивления распределительной линии натуральная мощность может быть увеличена только в \sqrt{q} раз. Учитывая реальный диапазон значений добротности распределительных линий $q=(0,45÷3,35)$, натуральная мощность с помощью продольной емкостной компенсации может быть увеличена не более чем в 1,83 раза. Следует также отметить, что при $q < 1,0$ продольная емкостная компенсация приводит даже к уменьшению натуральной мощности.

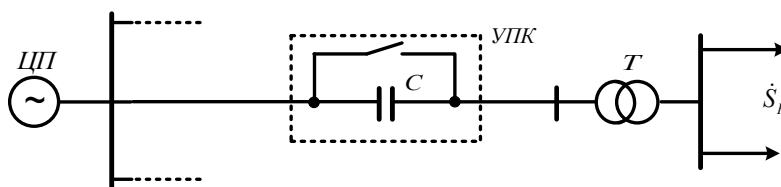


Рис. 1. Продольная емкостная компенсация распределительной линии

Еще одно негативное последствие продольной компенсации заключается в том, что неизбежно появляется перепад напряжения ΔU_C на конденсаторной батарее, величина которого ограничивается возможностью подключения потребителей после УПК. При допустимых перепадах напряжения $\Delta U_C = (10\div 15)\%$ степень продольной компенсации ограничена значениями $K_L = (0,4\div 0,6)$ [3]. В результате возможности продольной емкостной компенсации по увеличению натуральной мощности распределительной линии с потерями оказываются еще более ограниченными.

Поперечная емкостная компенсация. Осуществляется для увеличения емкостной проводимости распределительной линии, которое приведет к уменьшению волнового сопротивления и увеличению натуральной мощности. Идеальной может быть непрерывная и равномерная компенсация погонной емкостной проводимости за счет увеличения собственной емкости фазных проводов распределительной линии. Для этого необходимо одновременно уменьшать расстояние между фазными проводами и увеличивать фактический радиус фазного провода (например, за счет расщепления фазных проводов).

Однако радикально уменьшить расстояние между фазными проводами невозможно по условиям электрической прочности воздушных промежутков. Расщепление фазных проводов является дорогостоящим мероприятием, которое вряд ли экономически оправданно для сравнительно коротких распределительных линий 6-110 кВ. Кроме того, изменение геометрических размеров распределительной линии и фазных проводов даст весьма ограниченный технический эффект увеличения погонной емкостной проводимости и уменьшения волнового сопротивления.

Гораздо более эффективной и рациональной является практическая реализация поперечной емкостной компенсации с помощью сосредоточенных конденсаторов, равномерно распределенных вдоль линии. Для этого линия длиной l разделяется в общем случае на n одинаковых участков, к каждому из которых подключается конденсатор. Возможны два варианта размещения конденсаторов на участке линии, как показано на рис. 2.

В первом случае конденсаторы включаются по концам каждого участка линии l/n (рис. 2, а), а во втором случае конденсаторы включаются в середине каждого участка длиной l/n (рис. 2, б). В обоих случаях суммарная емкость конденсаторов одинакова

$$C_z = n \times C,$$

но количество конденсаторов разное. В первом случае (рис. 2, а) для реализации поперечной емкостной компенсации необходимы $(n-1)$ конденсаторов с емкостью C и два конденсатора с емкостью $C/2$, а во втором случае (рис. 2, б) необходимы n одинаковых конденсаторов емкостью C . Поэтому второй вариант распределения конденсаторов вдоль линии с точки

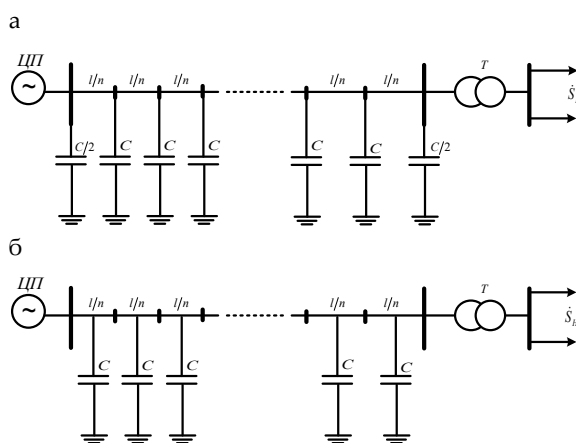


Рис. 2. Поперечная емкостная компенсация распределительной линии с конденсаторами на концах (а) и в середине (б) участков

зрения практической реализации выглядит предпочтительней.

Волновое сопротивление и натуральная мощность компенсированной распределительной линии. Для увеличения натуральной мощности распределительной линии 6-110 кВ до уровня пропускной способности, ограниченной по экономической плотности тока или допустимой по нагреву плотности тока, необходимо соответствующим образом уменьшить волновое сопротивление посредством поперечной емкостной компенсации.

Учитывая равномерность распределения конденсаторов, волновое сопротивление компенсированной распределительной линии можно определить с помощью выражения

$$\dot{Z}_{B(K)} = \sqrt{\frac{(r_0 + jx_0) \cdot l}{(jb_0 + jb_{K(0)}) \cdot l}} = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{j \cdot (b_0 + b_{K(0)})}}, \quad (17)$$

где $b_{K(0)} = n \times b/l = n \times \omega \times C/l$ – «погонная» емкостная проводимость конденсаторов C поперечной емкостной компенсации; n – количество конденсаторов поперечной емкостной компенсации.

Тогда расчетная величина

$$C_{K(0)} = \frac{n \cdot C}{l}$$

представляет собой часть суммарной емкости конденсаторов поперечной емкостной компенсации, приходящейся на единицу длины (1 км) распределительной линии. Выражение (17) путем несложных преобразований приводит к более удобному для дальнейшего анализа виду

$$\dot{Z}_{B(K)} = \frac{Z_B}{\sqrt{q \cdot (K_C + 1)}} \cdot \sqrt{q \cdot j}, \quad (18)$$

где $K_C = b_{K(0)}/b_0 = C_{K(0)}/C_0$ – степень поперечной емкостной компенсации.

С использованием преобразования [6] комплексная величина волнового сопротивления компенсированной распределительной линии представляется в алгебраической форме

$$\dot{Z}_{B(K)} = \frac{Z_B}{\sqrt{2 \cdot (K_C + 1)}} \cdot \left[\sqrt{\sqrt{q^{-2} + 1} + 1} - j \cdot \sqrt{\sqrt{q^{-2} + 1} - 1} \right], \quad (19)$$

позволяющей определить модуль $Z_{B(K)}$ и аргумент $\varphi_{B(K)}$:

$$Z_{B(K)} = Z_B \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{q^{-2} + 1}}{K_C + 1}}, \quad (20)$$

$$\varphi_{B(K)} = \sqrt{\frac{\sqrt{q^{-2} + 1} - 1}{\sqrt{q^{-2} + 1} + 1}}. \quad (21)$$

Как видно, аргумент волнового сопротивления не зависит от наличия поперечной емкостной компенсации и определяется только параметрами некомпенсированной распределительной линии с потерями. В частности, при отсутствии потерь ($q = \infty$) аргумент волнового сопротивления обращается в нуль ($\varphi_{B(K)} = 0$).

С учетом (20) натуральная мощность компенсированной распределительной линии с потерями будет определяться выражением

$$P_{НАТ(K)} = \frac{P_{НАТ}}{\sqrt[4]{q^{-2} + 1}} \cdot \sqrt{K_C + 1} = P_{НАТ(П)} \cdot \sqrt{K_C + 1}, \quad (22)$$

которое показывает достаточно высокую эффективность поперечной емкостной компенсации.

Это объясняется тем, что величина степени поперечной емкостной компенсации может изменяться в диапазоне $0 \leq K_C \leq \infty$, теоретически обеспечивая возможность уменьшения волнового сопротивления до нулевого значения ($Z_{B(K)} \rightarrow 0$) и соответственно теоретически неограниченного увеличения натуральной мощности ($P_{НАТ(K)} \rightarrow 0$).

Выражение (22) позволяет решить и обратную задачу определения необходимой степени поперечной емкостной компенсации для повышения натуральной мощности до наперед заданного значения

$$K_C = \left[(P_{НАТ(K)}^*)^2 \cdot \sqrt{q^{-2} + 1} - 1 \right], \quad (23)$$

где $P_{НАТ(K)}^* = P_{НАТ(K)} / P_{НАТ(П)}$ – относительная величина натуральной мощности компенсированной распределительной линии.

Если необходимо увеличить натуральную мощность распределительной линии до значения пропускной способности, ограниченной экономической плотностью тока, то степень поперечной емкостной компенсации должна принимать значение

$$K_{C(э)} = \left[(P_{(э)}^*)^2 \cdot \sqrt{q^{-2} + 1} - 1 \right], \quad (24)$$

а если до значения пропускной способности, ограниченной допустимой по нагреву плотностью тока, то степень поперечной емкостной компенсации должна составить

$$K_{C(0т)} = \left[(P_{(0т)}^*)^2 \cdot \sqrt{q^{-2} + 1} - 1 \right], \quad (25)$$

где $P_{(э)}^* = P_{(э)} / P_{НАТ(П)}$, $P_{(0т)}^* = P_{(0т)} / P_{НАТ(П)}$ – относительные величины пропускной способности компенсированной распределительной линии, ограниченные экономической плотностью тока и допустимой по нагреву плотностью тока соответственно.

В табл. 4 представлены количественные оценки степени поперечной емкостной компенсации, полученные с помощью выражений (24) и (25) и необходимые для увеличения натуральной мощности распределительных линий.

Учитывая незначительную величину погонной емкости распределительных линий (8,25÷8,53) нФ/км, радикальное уменьшение волнового сопротивления и соответственно увеличение натуральной мощности, например в 10 раз, может быть обеспечено с помощью сравнительно небольших по емкости конденсаторов порядка (0,82÷0,845) мкФ/км [10].

Следует отметить, что при поперечной емкостной компенсации одновременно с волновым сопротивлением будет изменяться и волновая длина распределительной линии. Для предварительной оценки волновой длины компенсированных распределительных линий без учета потерь можно воспользоваться соотношением

$$\lambda'_{(K)} = l \cdot \sqrt{x_0 \cdot b_0 \cdot (K_C + 1)} = \lambda \cdot \sqrt{K_C + 1}, \quad (26)$$

где $\lambda'_{(K)}$ – волновая длина компенсированной распределительной линии без потерь; $\lambda = l \cdot \sqrt{x_0 \cdot b_0}$ – волновая длина некомпенсированной распределительной линии без потерь.

Сравнивая (26) с (22), можно отметить, что при осуществлении поперечной емкостной компенсации волновая длина возрастет во столько же раз, во сколько увеличится натуральная мощность распределительной линии. Однако указанное обстоятельство, учитывая незначительную физическую длину распределительных линий, не является препятствием для реализации поперечной емкостной компенсации.

Таблица 4

Значения степени поперечной емкостной компенсации для распределительных линий разных классов напряжения

| $U_{НОМ}$, кВ | | 6 | 10 | 20 | 35 | 110(240) | 110(150) |
|----------------|---------|-------|------|--------|-------|----------|----------|
| $K_{C(э)}$ | $q=0,5$ | 42,37 | 30 | 13,57 | 7,26 | 3,64 | - |
| | $q=2,0$ | 20,68 | 14,5 | 6,28 | 3,13 | 1,32 | - |
| $K_{C(0т)}$ | $q=0,5$ | 1103 | 521 | 208,5 | 100,5 | 28,35 | 16,31 |
| | $q=2,0$ | 551 | 260 | 103,73 | 49,73 | 13,68 | 7,66 |

Выводы. Поперечная емкостная компенсация не накладывает технических ограничений на возможность увеличения натуральной мощности распределительной линии в отличие от продольной емкостной компенсации, возможности которой ограничиваются активным сопротивлением фазных проводов. Определена степень поперечной емкостной компенсации, необходимой для увеличения натуральной мощности распределительной линии до уровня пропускной способности, ограниченной экономической плотностью тока или допустимой по нагреву плотностью тока в фазных проводах.

Для выбора величины емкости конденсаторов поперечной емкостной компенсации отсутствуют какие-либо технические ограничения, позволяя получить необходимую величину натуральной мощности. Практическая реализация поперечной емкостной компенсации может быть осуществлена с помощью мачтовых конденсаторных батарей, установка которых не требует реконструкции распределительной линии.

Компенсированные распределительные линии могут служить одним из средств повышения коэффициента мощности в распределительных сетях с высоким уровнем потребления реактивной мощности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Зуев Э.Н.* Взгляд на проблемы передачи электроэнергии // ЭЛЕКТРО. 2005. №2. С. 2–8.
2. *Рыжов Ю.П.* Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 488 с.
3. Передача и распределение электрической энергии / А.А. Герасименко, В. Т. Федин. Изд. 2-е. Ростов н/Д: Феникс, 2008. 715с.
4. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. М.: ЭНАС, 2009. 456 с.
5. Электротехнический справочник: в 4 т. Т.3. Производство, передача и распределение электрической линии / под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. 9-е изд. стер. М.: Издательство МЭИ, 2004. 964 с.
6. *Берд Дж.* Инженерная математика: карманный справочник / пер. с англ. М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2008. 544 с.
7. *Алексеев Б.А.* Повышение пропускной способности воздушных линий электропередачи и применение проводов новых марок // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2009. №3. С.45–50.
8. *Kimbark E.W.* Improvement of system stability by switched series capacitors. IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, 1966, vol. PAS-85. № 2.
9. *Ивакин В.Н., Магницкий А.А.* Устройства продольной компенсации на полностью управляемых силовых полупроводниковых приборах // Электротехника. 2008. №10. С.47–57.
10. *Кувшинов А.А., Хренников А.Ю., Карманов В.Ф., Замула К., Володин Е., Шкурюпат И., Галиев И., Александров Н.* Поперечная емкостная компенсация реактивной мощности в распределительных сетях // Новости электротехники. 2017. №1(103). С.28–31.

Об авторах:

КУВШИНОВ Алексей Алексеевич

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электроснабжения и электротехники
Тольяттинский государственный университет
445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,
тел. +7 9297133998
E-mail: alekseikuvshinov@yandex.ru

ВАХНИНА Вера Васильевна

доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой электроснабжения и электротехники
Тольяттинский государственный университет
445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,
тел. +7 9272141700
E-mail: VVvahnina@yandex.ru

ЧЕРНЕНКО Алексей Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники
Тольяттинский государственный университет
445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,
тел. +7 9171342422
E-mail: tchernenko83@yandex.ru

KUVSHINOV Aleksey A.

Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Power Supply and Electrical Engineering Chair
Togliatti State University
445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya str., 14,
tel. +7 (929)7133998
E-mail: alekseikuvshinov@yandex.ru

VAKHNINA Vera V.

Doctor of Engineering Science, Professor, Head of the Power Supply and Electrical Engineering Chair
Togliatti State University,
445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya str., 14,
tel. +7 (927)2141700
E-mail: VVvahnina@yandex.ru

CHERNENKO Aleksey N.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Power Supply and Electrical Engineering Chair
Togliatti State University
445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya str., 14,
tel. +7 (917)1342422
E-mail: tchernenko83@yandex.ru

Для цитирования: *Кувшинов А.А., Вахнина В.В., Черненко А.Н.* Компенсированная распределительная линия с повышенной натуральной мощностью // Градостроительство и архитектура. 2017. Т.7, №4. С. 132-138. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.04.23.
For citation: *Kuvshinov A.A., Vakhnina V.V., Chernenko A.N.* Compensated distribution line with increased natural loading // Urban construction and architecture. 2017. V.7, 4. Pp. 132-138. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.04.23.