

References

1. Tutundaeva, D. V. New opportunities of PNS mode control at voltage phase change in network [text] / D. V. Tutundaeva, A. G. Fishov // Efficient management in power engineering. 2009. № 1.
2. Zeveke, G. V. Circuits theory principles [text] : textbook for institutes / G. V. Zeveke [and others]. – M. : Energy, 1975. – 752 p.
3. Idelchik, V. I. Power networks and systems [text] : textbook for institutes / V. I. Idelchik. – M. : Energoatomizdat, 1989. – 592 p.
4. Development of mathematical models, methods and devices for mode parameters study with the use of WAMS technologies [text] : report on scientific-research work (intermediate) 2009-1.1-230-016 / SEI HPE NC STU ; supervisor Kononov Yu. G.; executors Stepanov, A. S., Zhukov M. V. [and others]. – Stavropol, 2009. – 151 p. References : p. 132 – 143. № GR 02.740.11.0069. – Inv. № 02200954526.

УДК 621.311

О СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

А. С. Степанов, В. И. Маругин, А. А. Степанова

Предложена новая классификация составляющих потерь мощности в линиях электропередачи и расчетные выражения для их определения.

A new classification of components of power losses in transmission lines and the calculated expressions for their definition is offered.

Ключевые слова: линия электропередачи, мощность, напряжение, потери мощности, ток.

Key words: power line, power, voltage, power losses, current.

В расчетах сетей в настоящее время линии электропередач (ЛЭП) длиной до 300 – 400 км, как правило, принято представлять П-образными схемами замещения (рис. 1), элементами которых являются активное R и индуктивное X сопротивления и активная G и емкостная B проводимости [1].

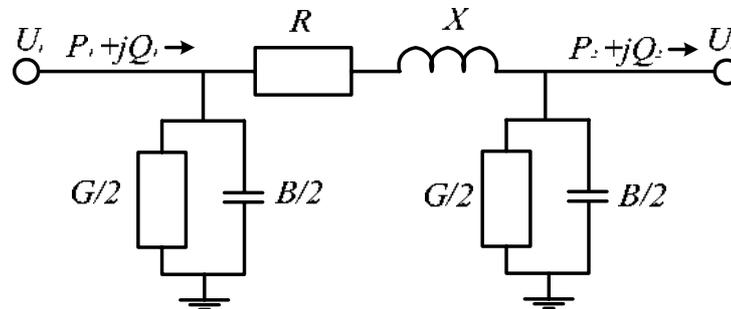


Рисунок 1 – П-образная схема замещения ЛЭП

Исходя из такого представления ЛЭП, принято считать, что потери активной мощности в линии электропередач складываются из двух составляющих: потерь в продольном сопротивлении R (нагрузочных) и потерь в поперечных проводимостях $G/2$ (условно-постоянных).

Первую составляющую можно определить по одной из двух формул:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_R &= \frac{(P_1 - U_1^2 G/2)^2 + (Q_1 + U_1^2 B/2)^2}{U_1^2} R \\ \Delta P_R &= \frac{(P_2 + U_2^2 G/2)^2 + (Q_2 - U_2^2 B/2)^2}{U_2^2} R \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

а вторую – по формуле:

$$\Delta P_G = (U_1^2 + U_2^2) G/2, \quad (2)$$

где P_1, Q_1, U_1 – активная и реактивная мощности и напряжение в начале ЛЭП, P_2, Q_2, U_2 – то же в конце электропередачи.



Как видно из формул (1) и (2), нагрузочные потери получают пропорциональными квадрату нагрузки линии, выраженной мощностями или током, а условно-постоянные – квадрату напряжений.

С другой стороны, наиболее полно описывающими физические процессы в линиях электропередач считаются уравнения длинной линии, которые для ЛЭП трехфазного переменного тока имеют вид [2]:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_l &= \underline{U}_2 \operatorname{ch} \gamma l + \sqrt{3} \underline{I}_2 \underline{Z}_c \operatorname{sh} \gamma l \\ \underline{I}_l &= \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} \underline{Z}_c} \operatorname{sh} \gamma l + \underline{I}_2 \operatorname{ch} \gamma l \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где $\underline{U}_l, \underline{I}_l$ – комплексы напряжения и тока в точке ЛЭП, расположенной на расстоянии l от ее конца, $\underline{U}_2, \underline{I}_2$ – комплексы напряжения и тока в конце ЛЭП, $\underline{Z}_c = Z_c (\cos \xi + j \sin \xi)$ – волновое сопротивление линии, $\gamma = \beta + j\alpha$ – коэффициент распространения электромагнитной волны.

В этом случае потери мощности можно определить как потери в равномерно распределенных сопротивлениях и проводимости линии по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_r &= 3r_0 \int_0^L I_l^2 dl \\ \Delta P_g &= g_0 \int_0^L U_l^2 dl \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где r_0 – погонное активное сопротивление ЛЭП, g_0 – ее погонная активная проводимость, L – полная длина линии.

Если подставить выражения (3) в (4), а также представить гиперболические функции комплексного аргумента γl в виде [3]:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{sh} \gamma l &= \operatorname{ch} \beta l \cos \alpha l + j \operatorname{sh} \beta l \sin \alpha l \\ \operatorname{ch} \gamma l &= \operatorname{sh} \beta l \cos \alpha l + j \operatorname{ch} \beta l \sin \alpha l \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

то можно после выполнения операции интегрирования и ряда математических преобразований получить следующие выражения для составляющих потерь активной мощности в ЛЭП:

$$\Delta P_r = r_0 \cdot \left[\frac{3}{4} I_2^2 \left(\frac{\operatorname{sh} 2\beta L}{\beta} + \frac{\sin 2\alpha L}{\alpha} \right) + \frac{U_2^2}{4Z_c^2} \left(\frac{\operatorname{sh} 2\beta L}{\beta} - \frac{\sin 2\alpha L}{\alpha} \right) + \frac{P_2}{2Z_c} \left(\frac{\operatorname{ch} 2\beta L - 1}{\beta} \cos \xi - \frac{\cos 2\alpha L - 1}{\alpha} \sin \xi \right) + \frac{Q_2}{2Z_c} \left(\frac{\operatorname{ch} 2\beta L - 1}{\beta} \sin \xi + \frac{\cos 2\alpha L - 1}{\alpha} \cos \xi \right) \right], \quad (6)$$

$$\Delta P_g = g_0 \cdot \left[\frac{3}{4} I_2^2 Z_c^2 \left(\frac{\operatorname{sh} 2\beta L}{\beta} - \frac{\sin 2\alpha L}{\alpha} \right) + \frac{U_2^2}{4} \left(\frac{\operatorname{sh} 2\beta L}{\beta} + \frac{\sin 2\alpha L}{\alpha} \right) + \frac{P_2}{2} Z_c \left(\frac{\operatorname{ch} 2\beta L - 1}{\beta} \cos \xi + \frac{\cos 2\alpha L - 1}{\alpha} \sin \xi \right) + \frac{Q_2}{2} Z_c \left(\frac{\operatorname{ch} 2\beta L - 1}{\beta} \sin \xi - \frac{\cos 2\alpha L - 1}{\alpha} \cos \xi \right) \right]. \quad (7)$$

С сожалением следует отметить, что приведенное в работе [3] выражение (2.28) выведено не совсем корректно из-за неучета комплексного характера волнового сопротивления линии.

Если уравнения длинной линии переписать в виде:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_l &= \underline{U}_1 \operatorname{ch} \gamma l - \sqrt{3} \underline{I}_1 \underline{Z}_c \operatorname{sh} \gamma l \\ \underline{I}_l &= -\frac{\underline{U}_1}{\sqrt{3} \underline{Z}_c} \operatorname{sh} \gamma l + \underline{I}_1 \operatorname{ch} \gamma l \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

то, по аналогии с (6) и (7), в которых составляющие потерь определяются по данным конца электропередачи, можно получить формулы для расчета составляющих потерь активной мощности по параметрам режима начала ЛЭП:



$$\Delta P_r = r_0 \cdot \left[\frac{3}{4} I_1^2 \left(\frac{\text{sh} 2\beta L}{\beta} + \frac{\sin 2\alpha L}{\alpha} \right) + \frac{U_1^2}{4 Z_c^2} \left(\frac{\text{sh} 2\beta L}{\beta} - \frac{\sin 2\alpha L}{\alpha} \right) - \frac{P_1}{2 Z_c} \left(\frac{\text{ch} 2\beta L - 1}{\beta} \cos \xi - \frac{\cos 2\alpha L - 1}{\alpha} \sin \xi \right) - \frac{Q_1}{2 Z_c} \left(\frac{\text{ch} 2\beta L - 1}{\beta} \sin \xi + \frac{\cos 2\alpha L - 1}{\alpha} \cos \xi \right) \right] \quad (9)$$

$$\Delta P_g = g_0 \cdot \left[\frac{3}{4} I_1^2 Z_c^2 \left(\frac{\text{sh} 2\beta L}{\beta} - \frac{\sin 2\alpha L}{\alpha} \right) + \frac{U_1^2}{4} \left(\frac{\text{sh} 2\beta L}{\beta} + \frac{\sin 2\alpha L}{\alpha} \right) - \frac{P_1}{2} Z_c \left(\frac{\text{ch} 2\beta L - 1}{\beta} \cos \xi + \frac{\cos 2\alpha L - 1}{\alpha} \sin \xi \right) - \frac{Q_1}{2} Z_c \left(\frac{\text{ch} 2\beta L - 1}{\beta} \sin \xi - \frac{\cos 2\alpha L - 1}{\alpha} \cos \xi \right) \right] \quad (10)$$

Введем следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} h_0 &= \frac{1}{4} \left(\frac{\text{sh} 2\beta L}{\beta} + \frac{\sin 2\alpha L}{\alpha} \right) \\ h_{Uz} &= \frac{1}{4 Z_c^2} \left(\frac{\text{sh} 2\beta L}{\beta} - \frac{\sin 2\alpha L}{\alpha} \right) \\ h_{Pz} &= \frac{1}{2 Z_c} \left(\frac{\text{ch} 2\beta L - 1}{\beta} \cos \xi - \frac{\cos 2\alpha L - 1}{\alpha} \sin \xi \right) \\ h_{Qz} &= \frac{1}{2 Z_c} \left(\frac{\text{ch} 2\beta L - 1}{\beta} \sin \xi + \frac{\cos 2\alpha L - 1}{\alpha} \cos \xi \right) \\ h_{ly} &= \frac{Z_c^2}{4} \left(\frac{\text{sh} 2\beta L}{\beta} - \frac{\sin 2\alpha L}{\alpha} \right) \\ h_{Py} &= \frac{Z_c}{2} \left(\frac{\text{ch} 2\beta L - 1}{\beta} \cos \xi + \frac{\cos 2\alpha L - 1}{\alpha} \sin \xi \right) \\ h_{Qy} &= \frac{Z_c}{2} \left(\frac{\text{ch} 2\beta L - 1}{\beta} \sin \xi - \frac{\cos 2\alpha L - 1}{\alpha} \cos \xi \right) \end{aligned} \right\}$$

Тогда выражения для составляющих потерь активной мощности, определяемых по данным конца или начала ЛЭП, можно записать следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_r &= r_0 \cdot \left(3 I_2^2 h_0 + U_2^2 h_{Uz} + P_2 h_{Pz} + Q_2 h_{Qz} \right) \\ \Delta P_g &= g_0 \cdot \left(3 I_2^2 h_{ly} + U_2^2 h_0 + P_2 h_{Py} + Q_2 h_{Qy} \right) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_r &= r_0 \cdot \left(3 I_1^2 h_0 + U_1^2 h_{Uz} - P_1 h_{Pz} - Q_1 h_{Qz} \right) \\ \Delta P_g &= g_0 \cdot \left(3 I_1^2 h_{ly} + U_1^2 h_0 - P_1 h_{Py} - Q_1 h_{Qy} \right) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Из выражений (12) и (13) видно, что составляющие потерь мощности в сопротивлении и в проводимости линии сами состоят из четырех слагаемых. При этом первое слагаемое во всех формулах зависит, по сути дела, от квадрата тока нагрузки, второе – от квадрата напряжения, а третье и четвертое – от потоков активной и реактивной мощности в конце линии. В работе [3] наличие двух последних слагаемых объясняется «волновым характером и распределенностью параметров линии, а также протеканием емкостных токов».

Таким образом, потери активной мощности в ЛЭП можно рассматривать как сумму двух составляющих:

1. Потери на активном сопротивлении линии электропередач.
2. Потери на активной проводимости ЛЭП.

При этом утверждать, что первые пропорциональны квадрату нагрузки, а вторые – квадрату напряжения, некорректно, поскольку каждая из составляющих содержит четыре слагаемых, по-разному зависящих от тока, мощности и напряжения.



Правомерно также рассматривать потери мощности как сумму четырех составляющих:

1. Потери, зависящие от квадрата тока в конце линии (нагрузочные).
2. Потери, зависящие от квадрата напряжения в конце линии (условно-постоянные).
3. Потери, зависящие от потока активной мощности в конце линии.
4. Потери, зависящие от потока реактивной мощности в конце линии.

В этом случае составляющие потерь должны вычисляться по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{нагр} &= 3I_2^2 (r_0 h_o + g_0 h_{ly}) \\ \Delta P_{yn} &= U_2^2 (r_0 h_{Uz} + g_0 h_0) \\ \Delta P_p &= P_2 (r_0 h_{pz} + g_0 h_{py}) \\ \Delta P_Q &= Q_2 (r_0 h_{Qz} + g_0 h_{Qy}) \end{aligned} \right\}. \quad (14)$$

Для сравнительно коротких электропередач, т. е. при $L \rightarrow 0$, можно принять $\text{sh}2\beta L \approx 2\beta L$; $\text{ch}2\beta L \approx 1$; $\sin 2\alpha L \approx 2\alpha L$; $\cos 2\alpha L \approx 1$. В этом случае из выражений (11) вытекает, что $h_0 \approx L$, а все остальные переменные h близки к нулю. Выражения (12) – (14) для составляющих потерь мощности при этом примут вид:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_r &= 3I_2^2 r_0 L = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} r_0 L \\ \Delta P_g &= U_2^2 g_0 L \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_r &= 3I_1^2 r_0 L = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} r_0 L \\ \Delta P_g &= U_1^2 g_0 L \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{нагр} &= \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} r_0 L \\ \Delta P_{yn} &= U_2^2 g_0 L \\ \Delta P_p &= 0 \\ \Delta P_Q &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (17)$$

Как видно из выражений (15) – (17), в случае сравнительно коротких ЛЭП

$$\Delta P_r = \Delta P_{нагр}, \quad \Delta P_g = \Delta P_{yn},$$

т. е. значения нагрузочных потерь практически совпадают с потерями в активном сопротивлении, а условно-постоянные потери – с потерями в активной проводимости.

В заключение следует отметить, что полученные выражения для определения составляющих потерь мощности универсальны и применимы к линиям электропередач трехфазного переменного синусоидального тока любого номинального напряжения.

Настоящая статья подготовлена по результатам выполнения госконтракта № 02.740.11.0069 от 11.06.2009, заключенного с Федеральным агентством по науке и инновациям в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

Литература

1. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети / В. И. Идельчик. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
2. Рыжов, Ю. П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения / Ю. П. Рыжов. – М. : Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с.
3. Поспелов, Г. Е. Потери мощности и энергии в электрических сетях / Г. Е. Поспелов, Н. М. Сыч. – М. : Энергоиздат, 1981. – 216 с.

References

1. Idelchik, V. I. Power networks and systems / V. I. Idelchik. – M. : Energoatomizdat, 1989. – 592 p.
2. Ryzhov, Yu. P. Distant electric power lines of super high voltage / Yu. P. Ryzhkov. – M. : PH MEI, 2007. – 488 p.
3. Pospelov, G. E. Losses of power and energy in networks / G. E. Pospelov, N. M. Sych. – M. : Energoizdat, 1982. – 216 p.