

УДК 681.5.033.3

МОДЕЛИ ЛЭП И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ

Власов А. А.

Научный руководитель – старший преподаватель Мышковец Е.В.

При расчетах установившихся режимов ЭЭС используются математические модели ЛЭП, трансформаторов и других элементов. Эти модели называются схемами замещения. Для ЛЭП относительно небольшой длины – до 400 км, используются схемы замещения с сосредоточенными параметрами. Воздушные ЛЭП напряжением 110 кВ и выше длиной до 400 км при расчетах установившихся режимов представляются П-образной схемы замещения:

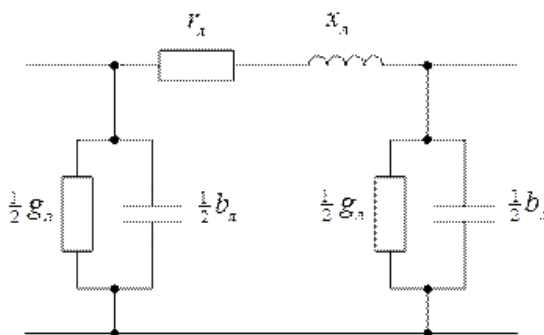


Рис. 1. П-образная схема замещения линии

r_l и x_l – активное и реактивное сопротивление линии соответственно;

g_l и b_l – активная и реактивная проводимость линии соответственно;

При выполнении расчетов линий 110-220 кВ используется упрощенная схема замещения:

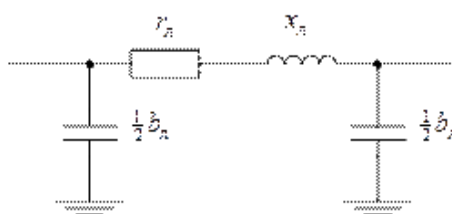


Рис. 2. Упрощенная схема замещения ЛЭП для линий 110-220 кВ

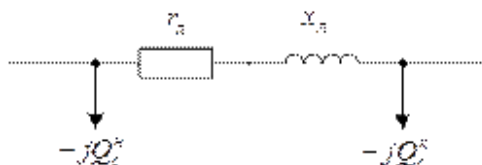


Рис. 3. Схема замещения ЛЭП с учетом зарядной мощности

На рис. 3 в схеме замещения вместо ветвей с проводимостями учитывается реактивная зарядная мощность, генерируемая емкостью линии. Верхние индексы «н» и «к» означают начало и конец линии и эти мощности равны половине всей зарядной мощности.

Для ВЛ 35 кВ и ниже не учитывают зарядную мощность:

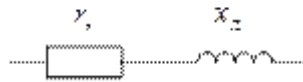


Рис. 4. Схема замещения ЛЭП для воздушных линий 35 кВ и ниже

Кабельные ЛЭП представляются также П-образной схемой замещения, но т. к. для КЛ $D_{ср}$ примерно в 100 раз меньше, чем для ВЛ, реактивное сопротивление кабеля становится малым по сравнению с активным и его не учитывают. Несмотря на то, что емкостная проводимость КЛ больше, чем ВЛ, для КЛ напряжением 6-10 кВ зарядная мощность все равно будет незначительной, поэтому ее можно не учитывать.

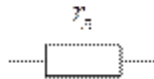


Рис. 5. Схема замещения кабельных линий напряжением 6-10 кВ

Передача электроэнергии по ЛЭП обусловлена распространением электромагнитных волн вдоль проводов. С учетом распределенности параметров линий и изменения токов и напряжений во времени соотношения между токами и напряжения в линии записываются в виде дифференциальных уравнений в частных производных с независимыми переменными времени и одной пространственной координаты. Решение таких уравнений с учетом граничных условий и синусоидальности изменения токов и напряжений во времени записывается в символической форме для действующих значений напряжений и токов по концам ЛЭП:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 * ch(\dot{\gamma} * l) + \dot{I}_2 * sh(\dot{\gamma} * l) \tag{1}$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_2}{\dot{z}_c} * sh(\dot{\gamma} * l) + \dot{I}_2 * ch(\dot{\gamma} * l) \tag{2}$$

где \dot{U}_1 и \dot{I}_1 – комплексные действующие значения напряжения и тока в начале линии (со стороны питания);

\dot{U}_2 и \dot{I}_2 – комплексные действующие значения напряжения и тока в конце линии (со стороны нагрузки);

$\dot{z}_c = \sqrt{\frac{\dot{z}_0}{\dot{y}_0}}$ – волновое сопротивление;

$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{z}_0 * \dot{y}_0} = \alpha + j\beta$ – коэффициент распространения волны;

где α – коэффициент затухания волны;

β – коэффициент фазы;

$\dot{z}_0 = r_0 + jx_0$ – комплексная величина погонного сопротивления фазы ЛЭП;

$\dot{y}_0 = g_0 + jb_0$ – комплексная величина погонной проводимости фазы ЛЭП.

Здесь и ниже для трехфазной системы значение тока увеличено в $\sqrt{3}$ раз, поэтому при сопоставлении тока с предельно допустимым его следует делить на $\sqrt{3}$.

Уравнения (1) и (2) называются уравнениями длинной линии и могут быть представлены как уравнения четырехполюсника (рис. 6) через параметры \dot{A} , \dot{B} , \dot{C} , \dot{D} .

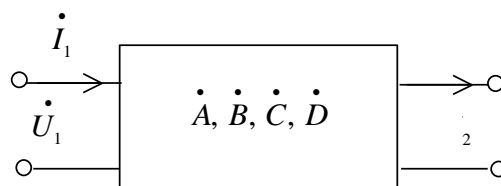


Рис. 6. Четырехполюсник

$$\dot{U}_1 = \dot{A} * \dot{U}_2 + \dot{B} * \dot{I}_2 \tag{3}$$

$$\dot{U}_1 = \dot{C} * \dot{U}_2 + \dot{D} * \dot{I}_2 \tag{4}$$

Таким образом, математической моделью ЛЭП, учитывающей распределенность параметров однородной ЛЭП, являются уравнения четырехполюсника с коэффициентами, которые получаются при сопоставлении уравнений (1), (2), (3), (4) соответственно. Назовем уравнения (1) и (2) *моделью 1* (уравнения длинной линии). Для упрощения исследования свойств ЛЭП иногда вводят понятие идеальной линии. В идеальной линии параметры r_0 и g_0 приравниваются к нулю, что соответствует отсутствию потерь. Такую модель назовем *моделью 2* (уравнение идеальной линии). В практических расчетах очень часто пренебрегают распределенностью параметров линии вследствие того, что большинство линий имеет небольшую длину, и интервал времени распространения электромагнитных волн в таких линиях значительно меньше периода изменения синусоидального напряжения и тока (0,02 с). Математическая модель линии в этом случае значительно упрощается и называется упрощенной моделью с сосредоточенными параметрами – *модель 3*.

Модель 3. Если ЛЭП представить П-образной схемой замещения с сосредоточенными параметрами (рис. 7) и допустить, что значения этих параметров можно вычислить умножением погонных параметров на длину ЛЭП то получим еще одну модель:

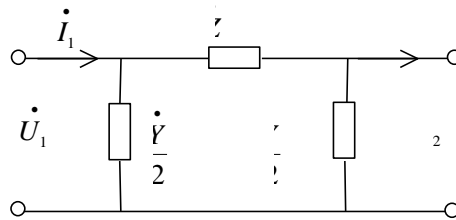


Рис. 7. П-образная схема замещения ЛЭП

Коэффициенты четырехполюсника через параметры схемы замещения равны:

$$\begin{aligned} \dot{A} = \dot{D} &= 1 + \dot{z}_0 * l * \frac{\dot{y}_0 * l}{2} = 1 + \frac{\dot{Z} * \dot{Y}}{2}; \\ \dot{B} &= \dot{z}_0 * l = \dot{Z}; \\ \dot{C}' &= \dot{y}_0 * l + \dot{z}_0 * l * \frac{(\dot{y}_0 * l)^2}{2} = \dot{Y} + \dot{Z} * \left(\frac{\dot{Y}}{2}\right)^2. \end{aligned}$$

Исследуем влияние выбранной модели ЛЭП на расчет установившегося режима. Для расчета будем пользоваться программой Mathcad. За эталонные данные примем данные расчета модели 1, поскольку она является наиболее универсальной в использовании. Расчет будет производиться для линии длиной 1000 км:

$$\begin{aligned} U_2 = 110 \quad I_2 = 10 \\ U_1 := U_2 \cdot \cosh(\gamma \cdot l) + I_2 \cdot Z_c \cdot \sinh(\gamma \cdot l) = 312.551 + 1.055i \times 10^3 \quad |U_1| = 1.101 \times 10^3 \\ I_1 := \frac{U_2}{Z_c} \cdot \cosh(\gamma \cdot l) + I_2 \cdot \sinh(\gamma \cdot l) = 4.517 + 10.881i \quad |I_1| = 11.781 \end{aligned}$$

Рис. 8. Расчет по модели 1.

$$\begin{aligned} U_2 = 110 \quad I_2 = 10 \quad r_0 = 0 \quad g_0 = 0 \\ U_1 := U_2 \cdot \cosh(\gamma \cdot l) + I_2 \cdot Z_c \cdot \sinh(\gamma \cdot l) = 59.433 + 841.471i \quad + |U_1| = 843.567 \\ I_1 := \frac{U_2}{Z_c} \cdot \cosh(\gamma \cdot l) + I_2 \cdot \sinh(\gamma \cdot l) = 0.594 + 8.415i \quad |I_1| = 8.436 \end{aligned}$$

Рис. 9. Расчет по модели 2.

$$\begin{aligned}
 U_2 &= 110 & I_2 &= 10 \\
 \underline{U}_1 &:= U_2 \cdot \left(1 + z_0 \cdot \frac{y_0 \cdot l}{2} \right) + I_2 \cdot (z_0 \cdot l) = 577 + 1.071i \times 10^3 & |U_1| &= 1.217 \times 10^3 \\
 \underline{I}_1 &:= U_2 \cdot \left[y_0 \cdot l + z_0 \cdot \frac{(y_0 \cdot l)^2}{2} \right] + I_2 \cdot \left(1 + z_0 \cdot \frac{y_0 \cdot l}{2} \right) = 6.901 + 7.842i & |I_1| &= 10.446
 \end{aligned}$$

Рис. 10. Расчет по модели 3.

Как видно из результатов расчетов, наибольшую погрешность дает расчет по модели 2, т. к. в ней не учитывается влияние на ЛЭП активного сопротивления и активной проводимости, что соответствует отсутствию потерь в линии, хотя на практике такого быть не может. Погрешность при расчете по модели 3 объясняется тем, что П-образная схема замещения используется, как правило, для расчета линий длиной до 400 км.

Литература

1. Математические модели элементов электроэнергетических систем в расчетах установившихся режимов и переходных процессов: учебное пособие / Р. А. Вайнштейн, Н. В. Коломиец, В. В. Шестакова. – Томск: изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 115 с.
2. Математическое моделирование электрических систем и их элементов / Лыкин А. В. – 2-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 228 с.
3. Математическое моделирование в задачах электроэнергетики / Любченко В. Я. – Новосибирск: НГТУ, 2006. – 68с.