

Л.В. ЕГИАЗАРЯН, В.С. САФАРЯН, Л.О. КАРАХАНИЯН, А.С. АРУТЮНЯН

**К ВОПРОСУ УТОЧНЕНИЯ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ НА КОРОНУ В
ВЫСОКОГОРНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Приведены результаты, полученные расчетным путем в виде зависимостей потерь мощности на корону от напряжения (относительно начального напряжения короны), которые позволяют определить потери энергии при короне в условиях хорошей погоды, сухого снега и дождя. Даются формулы, по которым аппроксимируются обобщенные характеристики потерь для трех погодных условий.

Ключевые слова: корона переменного тока, начальное напряжение короны, объемный заряд, потери мощности, сети.

Точность определения потерь мощности (электроэнергии) в электрических сетях, которая имеет технико-экономическое и социальное значение, зависит от точности моделирования сети, а также от применяемой математической модели установившегося режима. Самой “уязвимой”, с точки зрения точности расчета, является составляющая потерь мощности на корону, так как она зависит от ряда специфических факторов (метеорологических условий, электрического поля, геометрических параметров, расположения фазных проводов линий электропередач (ЛЭП) и т.д). В этой связи весьма актуальны исследования по повышению точности расчета потерь на корону в ЛЭП.

В “Руководящих указаниях по учету потерь на корону и помех от короны при выборе проводов воздушных линий электропередачи переменного тока 330(750 кВ и постоянного тока 800(1500 кВ)” [1] обобщены результаты экспериментальных исследований потерь мощности на корону, выполненных на опытных пролетах ЛЭП с одиночными и расщепленными проводами.

Известно, что основным фактором, влияющим на величину потерь мощности на корону, является отношение эквивалентной напряженности поля E_3 на поверхности проводов к начальной напряженности поля E_0 . Для начальной напряженности известно несколько эмпирических формул, полученных путем анализа и обобщения опытных данных [2], которые различаются степенями приближенности вычислений начального градиента электрического поля.

Более существенны расхождения, имеющиеся в подходах различных авторов по расчету напряженности поля E_3 на поверхности провода.

В [4] для определения E_3 предлагается формула

$$E_{\text{э}} = (E_{\text{max}} + E_{\text{cp}})/2, \quad (1)$$

где E_{cp} - среднее значение напряженности поля (определяется по действующему значению напряжения линии); E_{max} - максимальное значение напряженности поля (определяется по амплитудному значению напряжения линии).

В [1] принимается $E_{\text{cp}} = E_{\text{max}}$ и $E_{\text{э}} = E_{\text{max}}$, что, в конечном итоге, приводит к завышенным значениям потерь мощности на корону.

Влияние типовых погодных условий (хорошая погода, дождь, снег, изморозь) на потери мощности от короны изучено в основном на высоте 1000(2000 м над уровнем моря [3].

Экспериментальные исследования, проведенные в высокогорной экспериментальной станции Тюз-Ашу (Республика Киргизия) на высоте 3050 м над уровнем моря [4], показали, что значения обобщенных для различных сечений проводов потерь мощности на корону в хорошую погоду в 2(3 раза ниже потерь, рассчитанных по методике [1] для высокогорных ЛЭП. Потери мощности от короны, измеренные в условиях сухого снега и дождя на этой высоте, также существенно ниже потерь, рассчитанных по [1].

Таким образом, возникает необходимость проведения исследований с целью уточнения методики расчета потерь мощности и энергии на корону, в особенности применительно к высокогорным ЛЭП, что и выполнено в настоящей статье.

После принятия "Руководящих указаний..." [1] В.И. Левитовым и А.И. Тамазовым проводились разработки [5,6], учет которых существенно повышает точность расчетов.

Решение задачи о характеристиках короны на проводах в равнинных условиях получено В.И. Левитовым [5] путем вывода обоснованного уравнения характеристики потерь мощности на корону на основании интегральных характеристик короны и результатов зондовых исследований движения объемного заряда в поле короны переменного тока.

Согласно [5], в области общей короны зависимость потерь мощности от напряжения выражается формулой

$$P = \omega C^2 \frac{U(U - U_0)}{2} \cdot \frac{K_1 \cos \varphi_{K_1}}{C_{об} - C}, \quad (2)$$

где U_0 - напряжение, соответствующее критическому заряду на поверхности провода; U - амплитуда фазного напряжения; C , $C_{об}$ - емкость фазы и объемного заряда соответственно;

$C_{об} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(r_n/r_n)}$; r_n - радиус наружной области, в которой суммарная плотность объемного заряда имеет ненулевое значение; r_n - радиус фазного провода; φ_{K_1} - угол сдвига фаз первой гармоники "компенсированного" тока относительно напряжения; K_1 - отношение амплитуды первой

гармоники к амплитуде “компенсированного” заряда: $K_1 = Q_1/Q_{к\text{ макс}}$; ω - угловая частота переменного напряжения.

Множитель $K_1 \cos \varphi_{K_1}$ определен по экспериментальным данным при величине относительного перенапряжения $n=2$, для которой $K_1 \cos \varphi_{K_1} = 0,7$.

Таким образом, формула мощности потерь на корону принимает вид

$$P = 0,35\omega C^2 U(U - U_0)/(C_{об} - C). \quad (3)$$

Редуцированные характеристики (потери, деленные на напряжение) в области общей короны линейны, и мощность потерь определяется соотношением

$$P = b_p U(U - U_0), \quad (4)$$

где b_p - угловой коэффициент редуцированной характеристики для двойного перенапряжения:

$b_p = \frac{\omega}{\pi}(C_{об} - C)$; $C_{об}$ - емкость возникающего к моменту погасания короны

объемного заряда фазы при $U/U_0 = 2$: $C_{об} = \frac{\alpha_{11}}{\alpha_{11об}} C$; $\alpha_{11}, \alpha_{11об}$ - собственные потенциальные

коэффициенты провода и объемных зарядов фазы:

$$\alpha_{11} = \frac{\ln(2H/r_n)}{2\pi\epsilon_0}, \alpha_{11об} = \frac{\ln(2H/r_{эоб})}{2\pi\epsilon_0}; H - \text{эквивалентная высота фазового провода над землей; } r_{эоб}$$

- эквивалентный радиус объемных зарядов.

Для фазы с одним (нерасщепленным) проводом коэффициент $\alpha_{11об}$ равен

$$\alpha_{11об} = \frac{\ln(2H/r_e)}{2\pi\epsilon_0},$$

где $r_e = 6,6\sqrt{m_c r_n}$ - радиус фронта объемного заряда в момент погасания короны при $U/U_0 = 2$; m_c - среднее значение коэффициента снижения критического напряжения по отношению к начальному, определенное для каждого вида погоды.

Величины m_c в условиях хорошей погоды, сухого снега и дождя равны соответственно 0,87, 0,77 и 0,65 [6].

Аналитическое выражение (4) пригодно только при условии двойного перенапряжения $U/U_0 = 2$.

Таким образом, приведенные аналитические выражения позволяют рассчитать потери мощности на корону на основании геометрических характеристик ЛЭП, напряжения ЛЭП и метеорологических условий на соответствующей высоте прохождения трассы ЛЭП над уровнем моря.

Для правильной оценки потери мощности на корону целесообразно представить уравнение (4) в обобщенном виде, т.е. как отношение мощности потерь на произведение $b_p U^2$:

$$P^* = P/b_p U^2 = f(U/U_0). \quad (5)$$

Зависимости (5) для основных видов погоды приведены в виде сплошных линий на рис. 1 по данным измерений. Для аналитического описания этих обобщенных характеристик аппроксимируем их степенными полиномами шестой степени:

- в условиях хорошей погоды:

$$P^* = 39,664x^6 - 199,43x^5 + 403,96x^4 - 421,26x^3 + 238,85x^2 - 69,903x + 8,2574; \quad (6)$$

- в условиях сухого снега:

$$P^* = 2,7008x^6 - 9,7796x^5 + 11,437x^4 - 2,8441x^3 - 3,0036x^2 + 2,02x - 0,3375; \quad (7)$$

- в условиях дождя:

$$P^* = -12,573x^6 + 68,602x^5 - 150,93x^4 + 169,86x^3 - 102,02x^2 + 31,17x - 3,7827, \quad (8)$$

где $x = U/U_0$, а величина начального напряжения рассчитывается по формуле [5]

$$U_0 = \frac{nr_n 2\pi\epsilon_0}{CK_H} E_0 (0,8 + 0,2K_H), \quad (9)$$

n - количество проводов в пучке; r_n - радиус провода, м; E_0 - начальная напряженность, В/м:

$E_0 = 3 \cdot 10^4 m\delta \left(1 + \frac{0,03}{\sqrt{\delta \cdot r_n}}\right)$; ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость воздуха; δ - относительная

плотность воздуха при давлении P и абсолютной температуре T : $\delta = 0,386 \frac{P}{T}$; C - рабочая

емкость пучка проводов, Ф/м; K_H - коэффициент неравномерности распределения заряда по

поверхности провода в момент начала коронирования: $K_H = 1 + \frac{(n-1)r_n}{r_p}$; r_p - радиус

расщепления, м.

На рис. 1 кривые по (6)-(8) построены при: 1 - хорошей погоде, 2 - сухом снеге, 3 - дожде с интенсивностью 1 мм/ч.

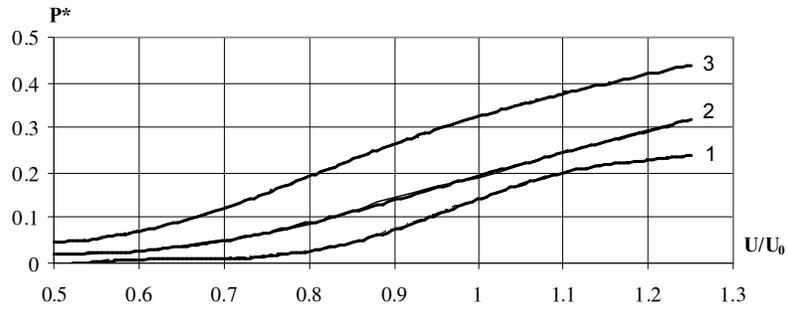


Рис. 1. Зависимость обобщенных потерь при мощности на корону в условиях: 1 - хорошей погоды, 2 - сухого снега, 3 - дождя

На основании аналитических выражений (5)-(8) нами рассчитаны потери мощности на корону для одной фазы трехфазной линии в условиях хорошей погоды, сухого снега и дождя при следующих геометрических параметрах опытных пролетов воздушной высоковольтной линии:

1. Высота провода над землей $H=12$ м, радиус провода $r_{\text{п}}=1,51$ см (провод АСО-500 на высоте 3050 м);
2. $H=7,5$ м, $r_{\text{п}}=1,26$ см (провод АСУ-300 на высоте 2000 м).

На рис. 2 представлены графики зависимости мощности потерь на корону для опытного пролета на высоте 3050 м по результатам измерений [4] при хорошей погоде, дожде средней интенсивности 1 мм/ч и сухом снеге соответственно.

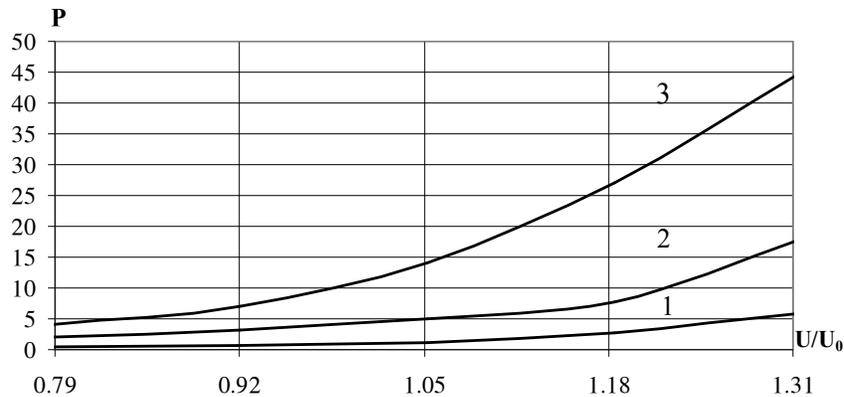


Рис. 2. Зависимость $P=f(U/U_0)$ при: 1 - хорошей погоде, 2 - сухом снеге, 3 - дожде, провод АСО-500, $\delta = 0,83$

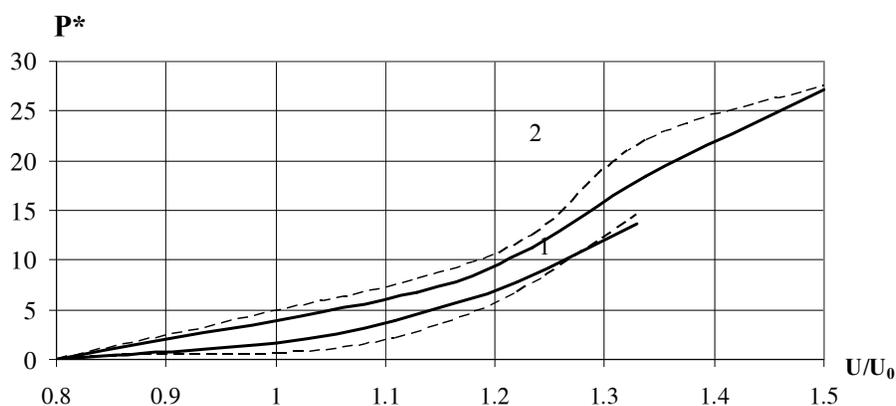


Рис. 3. Зависимость $P=f(U/U_0)$ при: 1 - хорошей погоде, 2 – дожде средней интенсивности 1 мм/ч на высоте 2000 м, провод АСУ-300, $\delta=0,8$

На рис. 3 приведены графики функции $P=f(U/U_0)$, построенные по данным измерений на опытном пролете у озера Севан на высоте около 2000 м [3], а также рассчитанные значения потерь при хорошей погоде и дожде средней интенсивности 1 мм/ч.

Для оценки влияния изменения относительной плотности воздуха на потери при короне были рассчитаны также мощности потерь при значениях $\delta > 0,8$ (0,85 и 0,9). При этом влияние δ отражается и в расчетном значении начального напряжения короны U_0 , и в величине радиуса фронта объемного заряда $r_{\text{об}}$.

На основании анализа вышеприведенных расчетных и экспериментальных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Расчетные значения потерь мощности на корону (рис.2-3) по предлагаемому методу отличаются от опытных характеристик не более, чем на 15%.
2. Потери мощности на корону, определенные предлагаемым методом, примерно в два раза меньше по сравнению с показателями [1].
3. В условиях сухого снега отклонения результатов расчета и опытных данных несколько больше, чем при хорошей погоде и дожде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководящие указания по учету потерь на корону и помех от короны при выборе проводов воздушных линий электропередачи переменного тока 330-750кВ и постоянного тока 800-1500 кВ.- М.: СЦНТИ ОРГРЭС, 1975.
2. Техника высоких напряжений / Под ред. **Д.В. Разевига**. -М.: Энергия, 1964.-471с.
3. Некоторые результаты исследования потерь мощности на корону переменного тока в высокогорных условиях / **Р.А. Грдзелян, А.М. Есяян, М.М. Карапетян и др.** // Изв. АН АрмССР. Серия Техн. наук.-1959.-Т.12, N2. - С. 25-33.
4. **Дикамбаев Ш.Б., Костюшко В.А., Ордоков И.О., Емельянов Н.П.** Исследование потерь мощности на корону на высокогорных линиях электропередачи переменного тока // Сб. “Исследования и испытания в электропередачах 750-1150 кВ”.-М.: Энергоатомиздат,1991.- С. 131-141.
5. **Левитов В.И.** Корона переменного тока. -М.: Энергия, 1975.-280 с.
6. **Тамазов А.И.** Корона на проводах воздушных линий переменного тока.- М.: Компания Спутник, 2002.-318с.

ЗАО “НИИ Энергетики”. Материал поступил в редакцию 07.09.2009.

Լ.Վ. ԵՂԻԱԶԱՐՅԱՆ, Վ.Ս.ՍԱԲԱՐՅԱՆ, Լ.Օ.ԿԱՐԱԽԱՆՅԱՆ, Ա.Ս.ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

ԲԱՐՁՐԼԵՌՆԱՅԻՆ ՕՂԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱԿԱՆ ԳՑԵՐՈՒՄ ՊՄԱԿԻ ՎՐԱ ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՆ ԿՈՐՈՒՍՏՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՀԱՐՑԻ ՄԱՍԻՆ

Բերված են հաշվարկային եղանակով ստացված պսակի լարման և հզորության կորուստների կախվածության արդյունքները, որոնցով հնարավոր է դառնում որոշել պսակում էներգիայի կորուստների քանակը լավ եղանակի, չոր ձյան և անձրևի պայմաններում: Տրվում են բանաձևեր, որոնց միջոցով մոտարկվում են կորուստների ընդհանրացված բնութագրերը եղանակային երեք պայմանների համար:

Առանցքային բառեր. փոփոխական հոսանքի պսակ, պսակի սկզբնական լարում, ծավալային լիցք, հզորության կորուստներ, ցանցեր:

L.V. YEGHIAZARYAN, V.S. SAFARYAN, L.O. KARAKHANYAN, A.S. HARUTYUNYAN

REFERRING TO THE PROBLEM OF CALCULATION REFINEMENT OF POWER LOSSES ON THE CORONA ON THE HIGHLAND OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINES

The results obtained with the help of calculations as dependences of power losses on the corona due to voltage (in the respect to the starting voltage of the corona), which allow to determine the power losses at the corona in the conditions of good weather, dry snow and rain are given. The formulas according to which the generalized characteristics of losses for three weather conditions are approximated are given.

Keywords: corona of alternating current, starting voltage of the corona, volumised charge, power losses, grids.