

ИССЛЕДОВАНИЯ КОРОННОГО РАЗРЯДА И РАСЧЁТЫ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ НА КОРОНУ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ.

Тамазов А.И.

В начале прошлого века было выяснено, что коронный разряд порождает в воздухе облака объёмных зарядов, на движение которых в электрическом поле тратится определённая энергия. В теоретических работах Таунсенда, Хольма, Майра, Дейча, Попкова [1-5], рассматривавших корону на гладких и чистых проводах, было показано, что потери на корону и переменного, и постоянного тока зависят от напряжения, подаваемого на провод, - U и начального напряжения короны $U_{0П}$. Одновременно велись экспериментальные исследования короны на проводах [6], которые показали, что величину $U_{0П}$ можно определить по начальной напряженности $E_{0П}$, рассчитываемой по формулам Пика или других авторов. В [6] было показано, что поверхность проводов, находящихся в эксплуатации, не бывает гладкой и тем более чистой, поэтому коронный разряд наблюдается при напряжениях, меньших $U_{0П}$. Таким образом, в действительности наблюдается два режима, которые характеризуются интенсивностью нарастанием потерь на корону при росте напряжения, причём при небольшом увеличении потерь имеет место местная корона, а при большой – общая. Наиболее чётко эти два режима отслеживаются на редуцированных характеристиках потерь, когда строятся зависимости $P/U=f(U)$ для переменного тока и $P/U^2=f(U)$ для постоянного. Местная корона возникает при некотором напряжении U_m (напряжении начала местной короны), когда начинает коронировать первая неоднородность в виде точечной короны. По мере роста напряжения количество коронирующих точек растёт, пока режим не перейдёт в режим общей короны, который характеризуется критическим напряжением коронного разряда U_0 и напряжением перехода от местной короны к общей $U_{л}$, которое больше U_0 . Напряжение U_0 определяется зарядом провода, который вследствие неоднородности поверхности оказывается меньше заряда гладкого провода. Поэтому величина U_0 зависит не только от метеорологических условий, но и от конструкции провода. Измерения потерь от короны на чистых витых проводах [6] показали, что по сравнению с гладкими проводами их начальное напряжение меньше, причём на тонких проводах оно снижается на ~20%, а на толстых – на ~10%.

В результате теоретических и экспериментальных исследований были получены различные зависимости потерь мощности общей короны от напряжения. В процессе поиска этих формул уточнялось и представление о сути рассматриваемого явления. Было показано, что данная задача относится к проблеме переноса и требует решения системы интегро-дифференциальных уравнений, причём граничные условия заранее не могут быть заданы, а определяются по мере развития процесса. Это и обуславливает необходимость применения при расчёте движения ионов метода последовательных приближений с принятием ряда допущений, облегчающих решение. В процессе исследования было выяснено, что в пучке проводов коронирует только часть поверхности провода, а плотность заряда у гладкой коронирующей поверхности постоянна. При неоднородной структуре поверхности провода, когда коронируют точки, средняя плотность зарядов не постоянна и достигает максимума вблизи внешней образующей провода в пучке, что позволяет уточнить представления о форме объёмных зарядов и распределении их плотности. По мере накопления знаний менялись и представления о зависимости потерь на корону от напряжения. При переменном напряжении, например, одни авторы считали, что эта зависимость линейная, другие – квадратичная. Рассматриваемые точки зрения были недалеко от истины, так как зависимость потерь на корону от напряжения, которое больше U_0 на 10 – 20 %, близка к линейной. При больших напряжениях эта зависимость для переменного тока имеет вид:

$$P = bU(U - U_0), \quad (1)$$

для униполярной короны постоянного тока

$$P_y = b_y U^2 (U - U_0), \quad (2)$$

для биполярной короны постоянного тока

$$P_{\delta} = b_{\delta} U (U - U_0)^2 + d_{\delta} U^2 (U - U_0), \quad (3)$$

где b , b_y , b_{δ} , d_{δ} – коэффициенты, которые можно рассчитать.

Эти формулы были получены теоретически и подтверждены экспериментом.

Из написанных формул следует, что потери общей короны могут быть приведены к безразмерному обобщённому виду

$$\begin{aligned} \frac{P}{bU^2} &= 1 - \frac{U_0}{U}, \\ \frac{P_y}{b_y U^3} &= 1 - \frac{U_0}{U}, \\ \frac{P_{\delta}}{b_{\delta} U^3} &= \left(1 - \frac{U_0}{U}\right)^2 + \frac{d_{\delta}}{b_{\delta}} \left(1 - \frac{U_0}{U}\right). \end{aligned} \quad (4)$$

Расчёты показали, что последнее соотношение в (4) для диапазона изменения $1 < U/U_{0П} < 3$ можно привести к более простому виду

$$\frac{P_{\delta}}{B_{\delta} U^3} = \left(0,5 - \frac{U_0}{U}\right) \left(1 - \frac{U_0}{U}\right). \quad (5)$$

Если коэффициенты B_{δ} , b_y определяются геометрическими параметрами воздушной линии (ВЛ), так как объёмный заряд практически полностью заполняет воздушное пространство вокруг проводов, то коэффициент b рассчитывается по геометрическим параметрам как ВЛ, так и объёмных зарядов, поскольку они локализованы вблизи проводов.

Значения B_{δ} рассчитываются по формуле

$$B_{\delta} = \frac{76 \cdot 10^{-10}}{\delta H^2 \ln \frac{2Hh}{r_p \sqrt{h^2 + H^2}}}, \quad (6)$$

δ – относительная плотность воздуха,

$2H$ – расстояние между полюсами ВЛ в м,

h – эквивалентная высота полюса над землёй в м,

$r_p = \sqrt[n]{r_n r_p^{n-1}}$ – эквивалентный радиус расщепления проводов полюса,

n – число проводов полюса в м,

r_n – радиус провода в м,

$r_p = \frac{a}{2 \sin \frac{\pi}{n}}$ – радиус расщепления в м,

a – шаг расщепления в м.

Величина b зависит от вида погоды и конструкции фазы

$$b_{ij} = \frac{\omega}{\pi} C \left(\frac{\ln \frac{2H}{r_{\delta n}}}{\ln \frac{2H}{r_{\delta o}}} - 1 \right), \quad (7)$$

где

i – вид погоды,

j – номер фазы,

$$r_{\delta n} = r_p \sqrt[n]{\frac{n r_n}{r_p}},$$

$$r_{\delta o} = (r_p + r_o) \sqrt[n]{\frac{n r_o}{r_p + r_o}},$$

$$H = H_{\min} + 0,25f,$$

$$r_p = \frac{a}{2 \sin \frac{\pi}{n}},$$

$$r_o = 4,7k_n \sqrt{m_c r_n \left(2 + \frac{n-1}{1 + \frac{r_p}{2k_n \sqrt{m_c r_n}}} \right)},$$

$$k_n = 1 + (n-1) \frac{r_n}{r_p},$$

$$U_{0П} = \frac{2\pi\epsilon r_n (0,8 + 0,2k_n)}{Ck_n} 3 \cdot 10^6 \delta \left(1 + \frac{0,03}{\sqrt{r_n} \delta} \right), \quad (r_n < 0,01 \text{ м}),$$

$$U_{0П} = \frac{2\pi\epsilon r_n (0,8 + 0,2k_n)}{Ck_n} 2,4 \cdot 10^6 \delta \left(1 + \frac{0,108}{r_n^{0,38} \delta^{0,3}} \right), \quad (r_n > 0,01 \text{ м}),$$

U – напряжение фазы ВЛ, В,

b – коэффициент потерь на корону в фазе, 1/Ом·м,

$U_{0П}$ – начальное напряжение, В,

ω – угловая частота сети, рад/с,

C – рабочая ёмкость фазы, Ф/м,

H – эквивалентная высота провода над землёй, м,

$r_{эп}$ – эквивалентный радиус пучка проводов, м,

$r_{эо}$ – эквивалентный радиус объёмных зарядов пучка, м,

n – число проводов в фазе,

r_n – радиус провода, м,

r_p – радиус расщепления проводов фазы, м,

H_{\min} – минимальное расстояние от провода до земли, м,

f – стрела провисания провода, м,

δ – среднегодовая плотность воздуха,

a – шаг расщепления, м,

r_o – радиус объёмного заряда, м,

m_c – коэффициент снижения критической напряжённости,

k_n – коэффициент неравномерности,

$\epsilon = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

В [7] показано, что в области местной короны обобщённые безразмерные потери мощности на корону также являются функциями U_0/U . В обобщённом виде для переменного тока эти потери будут иметь вид:

$$\frac{P}{b_p U^2} = \frac{\psi - 1}{(\psi - \varphi)^2} \left(\frac{U}{U_0} - 2\varphi + k_3^2 \varphi^2 \frac{U_0}{U} \right), \quad (8)$$

где $\psi = U_l/U_0$, $\varphi = U_{mc}/U_0$, $k_3 = U/U$,

U_{mc} – начальное напряжение местной короны,

U_l – напряжение перехода от местной короны к общей,

"с" и "к" – индексы, определяющие среднее и среднеквадратическое значения.

В [8] показано, что при постоянном токе имеют место две области местной короны, каждая из которых является линейной функцией U_0/U и характеризуется разной скоростью нарастания потерь при увеличении напряжения.

Таким образом, потери на корону постоянного и переменного тока как местные, так и общие, обобщаются в виде безразмерных функций от U_0/U .

Используя данные измерений на опытных пролётах, можно получить средние зависимости обобщённых потерь на корону от отношения U_0/U .

Если напряжение ВЛ относительно стабильно, то величина U_0 меняется в зависимости от состояния поверхности провода и воздуха, свойства которого зависят от погоды и её интенсивности. Поэтому, чтобы рассчитывать потери на корону в различных метеорологических условиях, необходимо помимо геометрических параметров ВЛ и объёмных зарядов знать, как изменяется величина U_0 или $U_0/U_{0П}$ при разных видах погоды. Величина

$$\frac{U_0}{U_{0П}} = \frac{E_0}{E_{0П}}, \quad (9)$$

где E_0 – критическая напряжённость на поверхности провода, которая меньше $E_{0П}$ и характеризует среднюю плотность заряда на поверхности провода.

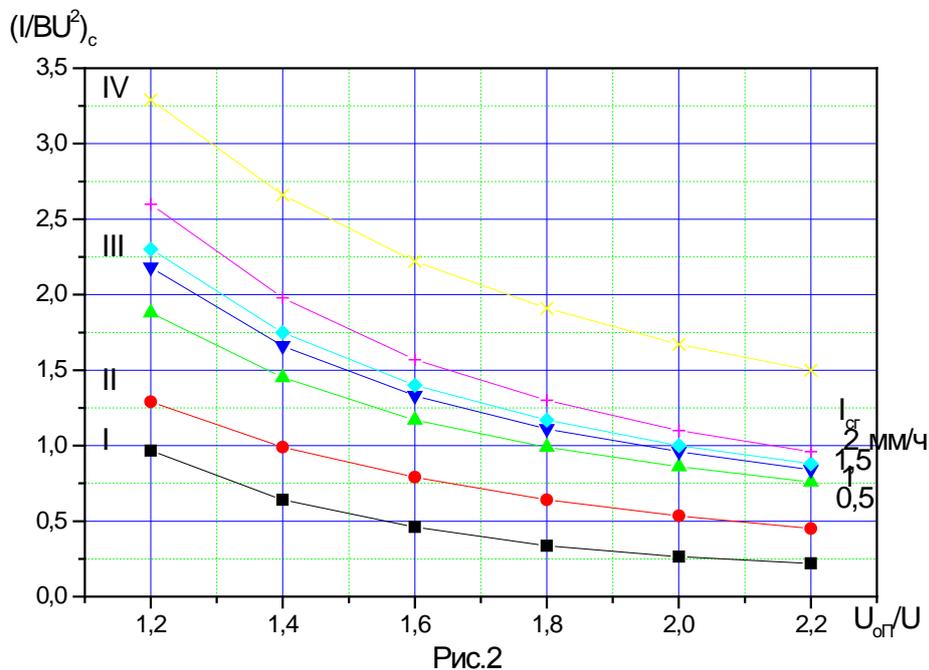
Так как напряжённость определяет свойства поля на единице поверхности, то отношение (9) при том или ином виде погоды не будет зависеть от радиуса провода. Следовательно, оно является универсальной характеристикой, определяющей воздействие погодных условий на коронный разряд. Поскольку изменение погодных условий случайно, то характеристикой отношения (9) должна быть его функция распределения, которая справедлива в условиях короны и переменного и постоянного тока. Нетрудно понять, что перейти от отношения $U_0/U_{0П}$ к U_0/U можно путём умножения на константу $U_{0П}/U$. Поэтому, зная распределение $U_0/U_{0П}$, можно найти распределение U_0/U , а по нему с помощью зависимости обобщённых потерь от U_0/U и распределение обобщённых потерь.

Распределение отношения $U_0/U_{0П}$ можно найти по результатам длительных непрерывных измерения потерь на корону при регистрации погодных явлений и их интенсивности. Эти измерения в действующих ВЛ 500 и 750 кВ и опытной ВЛ 1150 кВ переменного тока непрерывной длительностью около 10 лет позволили найти распределения $U_0/U_{0П}$ при разных видах погоды [7] - рис.1. На рис.1 даны кривые для: 1 – хорошей погоды, 2 – повышенной (более 90%) влажности воздуха, 3 – сухого снега, 4 – тумана, 5 – изморози, 6 – дождя среднегодовой интенсивностью 0,5 мм/ч, 7 – дождя интенсивностью 1 мм/ч, 8 – дождя интенсивностью 1,5 мм/ч, 9 – дождя интенсивностью 2 мм/ч. Действительно, по данным измерений в действующих ВЛ можно построить функцию распределения потерь на корону при данном виде погоды, а затем и функцию распределения обобщённых потерь, рассчитав коэффициент b . Большое количество измерений зависимости потерь на корону от напряжения на опытных пролётах позволяет получить среднюю зависимость обобщённых потерь от отношения U_0/U . Тогда каждому значению обобщённых потерь на корону соответствует определённая вероятность и значение U_0/U , поэтому можно построить функцию распределения отношения U_0/U . Умножая U_0/U на $U/U_{0П}$, можно получить функцию распределения $U_0/U_{0П}$. Таким образом были рассчитаны функции распределения $U_0/U_{0П}$ для таких видов погоды, как выпадение сухого снега, повышенная (более 90%) влажность воздуха, туман, изморозь. Распределения $U_0/U_{0П}$ для хорошей погоды были получены по данным измерений на опытных пролётах с учётом среднегодовых изменений плотности воздуха. Для расчёта распределения $U_0/U_{0П}$ в дождь использовалась зависимость $E_0/E_{0П}$ от заданной интенсивности дождя, полученная по данным лабораторных измерений, а также обобщённая функция распределения среднегодовой относительной интенсивности дождя, которая не зависит от места расположения на поверхности Земли.

Теперь, зная распределения $U_0/U_{0П}$ для всех видов погоды, можно рассчитать распределения обобщённых потерь на корону для различных значений $U_{0П}/U$ и средние их значения на линиях как постоянного, так и переменного тока. На рис.2 представлены зависимости средних обобщённых потерь от $U_{0П}/U$ для биполярной линии [9] при четырёх видах погоды: I – хорошей, II – повышенной влажности воздуха и сухом снеге, III – тумане, мокром снеге и дожде разной интенсивности, IV – изморози и гололёде, а на рис.3 – для фазы ВЛ переменного тока [7] при: 1 – хорошей погоде, 2 – повышенной влажности воздуха, 3 – сухом снеге, 4 – тумане, 5 – изморози,

ба – дожде среднегодовой интенсивностью 0,5 мм/ч, бб – дожде интенсивностью 1 мм/ч, бв – дожде интенсивностью 1,5 мм/ч, бг – дожде интенсивностью 2 мм/ч.

Снижение числа видов погоды при расчёте потерь на корону в ВЛ постоянного тока определяется тем, что (и это видно из рис.2 и 3) различие в величине потерь при разных видах погоды при постоянном токе по сравнению с переменным уменьшается.



Литература

1. Townsend J.S. Electricity in Gases. Oxford. Clarendon Press. 1915.
2. Holm R. Die Theorie der Wechselstromkorona an Hochspannungsleitungen. Archiv fur Elektrotechnik. 1927. Bd.18.
3. Mayr O. Beitrag zur Theorie der Wechelspannungs Korona. Jahrbuch der AEG Forschung. 1942. neunter bd.
4. Deutsch W. Uber die Dichteverteilung unipolarer Ionenstrome. Annalen der Physik. 1933. Bd.16.
5. Попков В.И. Коронный разряд и линии сверхвысокого напряжения. М. Наука. 1990.
6. Пик Ф. Диэлектрические явления в технике высоких напряжений. ГЭИ. 1934.
7. Тамазов А.И. Корона на проводах воздушных линий переменного тока. М. Спутник+. 2002.
8. Тамазов А.И. Обобщённые характеристики токов короны воздушных линий электропередачи постоянного тока. Электро.2003. №1.
9. Тамазов А.И. Распределение обобщённых токов и расчёт среднегодовых потерь мощности на корону биполярных воздушных линий электропередачи. Электро. 2003. №2

Тамазов Александр Иосифович канд. техн. наук, ст. научн. сотр. ОАО "ЭНИН им.Г.М.Кржижановского".119991 Москва ГСП-1 Ленинский просп. 19. тел. 373-20-30.
E-mail: hvcenter@mail.ru