

## ПОВЫШЕНИЕ ГРОЗОУПОРНОСТИ ДВУХЦЕПНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 110-330 кВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Запорожченко С.И.

Донецкий государственный технический университет

*This article proposes way increase of lightning withstand duplicate overhead line with help of choosing insulator strings with different volt-second characteristics In conditions of exploitation.*

В настоящее время для сооружения воздушных линий (ВЛ) 110-330 кВ нашли широкое применение двухцепные опоры, использование которых уменьшает капитальные затраты и время ввода линий в эксплуатацию, однако грозоупорность таких линий меньше, чем одноцепных за счет более высоких опор, а также из-за возможности одновременного грозового перекрытия двух цепей [1]. В случае неуспешного АПВ это может привести к перерыву электроснабжения потребителей и связанному с этим ущербу от недоотпуска электроэнергии.

Поэтому изыскание способов повышения грозоупорности двухцепных ВЛ в особенности для районов с повышенной грозовой деятельностью является актуальной задачей.

В настоящей работе приводятся результаты исследования эффективности мероприятия, основанного на увеличении импульсной прочности гирлянд на одной из параллельных цепей за счет подвески дополнительных изоляторов. Кроме того, при перекрытии первой цепи возникает нетиповой случай расчета для второй цепи. Приводится разработанная автором корректировка методики определения импульсных напряжений на второй цепи после перекрытия первой.

По данным [1,2] для ВЛ до 330 кВ основное число перекрытий гирлянд связано с ударами молний в вершину опоры или в трос вблизи опоры. Поэтому данный случай взят в качестве расчетного.

При ударе в трос или опору перекрытие гирлянд произойдет при выполнении условия:

$$\Delta U_{\text{гирл}} = U_0 - U_{\text{пр}} \geq U_{\text{имп}} \quad (1)$$

где  $\Delta U_{\text{гирл}}$  – импульсное напряжение на гирлянде;

$U_0$  – напряжение на опоре, обусловленное падением напряжения в заземлении опоры  $U_R$ , в индуктивности опоры  $U_L$  и взаимной индукции с каналом молнии  $U_M$ ;  $U_0 = U_R + U_L + U_M$ ;

$U_{\text{пр}}$  – напряжение на проводе, индуктированное волной на тросе  $U_{\text{инд.т}} = K_{\text{св}} U_0$ , зарядом лидера молнии  $U_{\text{инд.м}}$  и действием мгновенного максимального напряжения на проводе  $U_{\text{раб.м}}$ ;  $U_{\text{пр}} = U_{\text{инд.т}} - U_{\text{инд.м}} - U_{\text{раб.м}}$ ;

$U_{\text{имп}}$  – импульсная прочность гирлянды определяется ее вольт-секундной характеристикой (в.с.х.).

Для анализа влияния различных факторов на  $\Delta U_{\text{гирл}}$  приводятся формулы, по которым вычисляется указанные в (1) напряжения.

$$\Delta U_R = i_0 R_3; U_L = L_0 \frac{di_0}{dt}; U_M = M_{0м} \frac{di_m}{dt}; U_{\text{инд.т}} = K_{\text{св}} U_0; U_{\text{инд.м}} = E_{\text{ср}} h_{\text{ср}} (1 - K_{\text{св}}),$$

где  $i_0$  – часть тока молнии, ответвляющаяся в опору;  $R_3$  – сопротивление заземления опоры;  $L_0$  – индуктивность опоры, зависящая от конструкции и высоты;  $M_{0м}$  – взаимная индуктивность канал молнии-опора;  $i_m$  – ток молнии;  $K_{\text{св}}$  – коэффициент связи системы провод-трос;  $E_{\text{ср}}$  – средняя напряженность, создаваемая лидером;  $h_{\text{ср}}$  – средняя высота подвески провода в пролете.

Импульсная прочность гирлянды изоляторов определяется следующей формулой:

$$U(t) = \frac{U_{50\%}}{1,145} \sqrt{1 + \frac{3,1}{t}},$$

где  $U_{50\%}$  – 50%-ное импульсное разрядное напряжение гирлянды при полной волне.

Подставив все составляющие в уравнение (1) получим следующее условие грозоупорности:

$$\Delta U_{\text{гирл}} = i_0 R_3 + L_0 \frac{di_0}{dt} + M_{0м} \frac{di_m}{dt} - (K_{\text{св}} U_0 - E_{\text{ср}} h_{\text{ср}} (1 - K_{\text{св}}) - U_{\text{макс раб}}) \leq \frac{U_{50\%}}{1,145} \sqrt{1 + \frac{3,1}{t}}, \quad (2)$$

Проанализируем влияние отдельных параметров, входящих в (2) на грозоупорность.

Значения  $L_0$ ,  $M_{0м}$ ,  $K_{\text{св}}$ ,  $h_{\text{ср}}$  связаны с конструкцией опор, которые являются унифицированными и выбираются в зависимости от номинального напряжения, условий трассы и т.д. и поэтому специально для изменения грозоупорности их заменять нецелесообразно. Сопротивление заземления опоры  $R_3$  выбираются в зависимости от удельного сопротивления и других характеристик грунта. Условие грозоупорности при этом не учитывается.

В принципе перечисленные выше параметры можно подобрать с учетом грозоупорности на основе технико-экономических расчетов, но это должно происходить на стадии проектирования. В статье же рассматриваются только условия эксплуатации.

Рассмотрим возможности влияния на правую часть уравнения (2). Входящие в уравнение 50%-ное импульсное разрядное напряжение гирлянды зависит от типа применяемых изоляторов и их количества и приведено в табл. 1 [3].

Таблица 1 - Значения 50%-ных импульсных разрядных напряжений гирлянд изоляторов.

U <sub>ном</sub> , кВ	Изоляция	U <sub>50%</sub> , кВ
110	7хП-4,5	660
	8хПМ-4,5	640
220	14хПМ-4,5	1100
	14хП-4,50	1300
330	19хПМ-4,5	1280
	18хПМ-4,5	1200
	17хП-4,5	1400

Из табл.1 видно, что применяя для каждой из двух цепей различные гирлянды изоляторов можно сделать различным их U<sub>50%</sub>. Но это также может производиться на стадии проектирования. В условиях эксплуатации изменить импульсное разрядное напряжение гирлянды одной из цепей можно за счет подвески дополнительных изоляторов. При этом число дополнительных изоляторов должно быть таким, чтобы габаритное расстояние в пролете практически не нарушалось. Если дополнительно подвесить, например, 2 наибольших по высоте изолятора типа П-4,5, то стрела провеса увеличится на 0,33м, что изменит габарит для ВЛ с номинальным напряжением 35-110кВ на 5%, 220кВ – 4,7%, 330кВ – 4,4%. При одном изоляторе эти значения будут в 2 раза меньше. Изменение габаритов в таких пределах является допустимым и отражается в допуске на габарит введением величины Δh. Кроме того максимальная стрела провеса, равная расчетной максимальной – редкое событие и может регулироваться в условиях эксплуатации. Поэтому по техническим соображениям подвеску двух дополнительных изоляторов можно считать допустимой.

Импульсное напряжение на гирлянде, как следует из (2), зависит от амплитуды и крутизны тока молнии  $d i / d t$ , имеющих вероятностный характер. Ординаты в.с.х. зависят от числа изоляторов. Чем больше изоляторов, тем больше значение параметров тока молнии, а следовательно, и меньшая их вероятность потребуется для перекрытия. Таким образом, увеличивая в.с.х. одной из цепей, уменьшаем ожидаемое число одновременного отключения двух цепей.

Метод расчета отдельных составляющих выражения (2) в зависимости от параметров тока молнии и конструктивных данных опор при идентичности в.с.х. обеих цепей хорошо известен, например [1,3,4] и в статье не приводится.

При неидентичности в.с.х., связанной с неравным числом изоляторов, в начале происходит перекрытие цепи с меньшим числом изоляторов. При этом пораженный провод оказывается соединенным с тросом, что приводит к изменению коэффициента связи (K<sub>св</sub>) трос-провод и изменению напряжения, индуктированного на непораженном проводе током в тросе U<sub>инд.т</sub> = K<sub>св</sub> U<sub>0</sub>, входящем в выражение (2). Возникает нетиповой случай расчета, связанный с необходимостью определения K<sub>св</sub>, который в стандартном случае задается в таблицах в зависимости от размеров опоры [1]. Для определения коэффициента связи воспользуемся методикой расчета электрической цепи при наличии взаимной индукции между ветвями [5].

Схема электрической цепи представлена на рис. 1, где 1 – трос, 2 – пораженный провод, 3 – непораженный провод, I<sub>м</sub> – ток молнии.

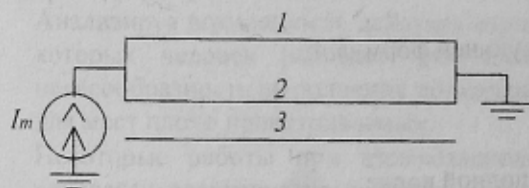


Рисунок 1 – Электрическая цепь при грозном поражении одной из цепей.

Используя закон Ома можно составить следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} U_1 = U &= I_1 Z_{11} + I_2 Z_{12}, \\ U_2 = U &= I_1 Z_{21} + I_2 Z_{22}, \\ U_3 &= I_1 Z_{31} + I_2 Z_{32}. \end{aligned} \quad (3)$$

Из первых двух уравнений системы (3) определяются токи, после подстановки которых в третье уравнение, формула связи напряжения U<sub>3</sub> с напряжением U будет иметь вид:

$$U_3 = \frac{(Z_{22} - Z_{12})Z_{13} + (Z_{11} - Z_{21})Z_{23}}{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21}} U,$$

где дробь перед напряжением U и является искомым коэффициентом связи, который с учетом равенства  $Z_{12} = Z_{21}$  можно записать:

$$K_{св} = \frac{Z_{11}Z_{23} + Z_{22}Z_{13} - Z_{12}Z_{13} - Z_{12}Z_{23}}{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}^2}. \quad (4)$$

Собственные и взаимные сопротивления, входящие в (4) определяются по формулам из [1,3,4] и конструктивным данным опор [6].

По формуле (1) было определено ожидаемое число перекрытий гирлянд обеих цепей при идентичности их в.с.х., а с уточнениями коэффициента связи определено число перекрытий при подвеске дополнительных изоляторов на одной из цепей. Число дополнительных изоляторов принималось 1–2, исходя из технических



возможностей использовать неизменную длину пролета линий. Расчет проведен для 100 грозových часов в году на 100км длины линии. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2 - Ожидаемое число одновременных отключений двух цепей линий 1/год.

U <sub>ном</sub> , кВ	Число дополнительных изоляторов, шт.	Число отключений 1/год	% снижения отключений
110	0	4,57	
	1	3,88	15
220	0	1,52	
	1	1,15	24
	2	0,945	38
330	0	0,894	
	1	0,677	24
	2	0,533	48

Из табл. 2 видно, что увеличение на одной из цепей числа изоляторов на 1–2 снижает ожидаемое число отключений на 15–48%, при этом с ростом номинального напряжения процент снижения возрастает.

В результате повышения грозоупорности уменьшаются затраты от ущерба в связи с недоотпуском электроэнергии, но с другой стороны возрастают затраты, связанные с подвеской дополнительных изоляторов. Разность между затратами определяет экономический эффект мероприятия:

$$Z_{эф} = U_0 (n_1 - n_2) (1 - a) P_{\Sigma} T_{ав} - 3 m K_0 l_n (P_a + E_n) / l_{пр}, \quad (5)$$

где  $U_0$  – удельный ущерб от недоотпуска электроэнергии, грн/кВт ч;

$n_1, n_2$  – число одновременных отключений двух цепей при одинаковом и разном числе изоляторов соответственно;

$a$  – доля успешных АПВ, о.е.;

$P_{\Sigma}$  – суммарная мощность двух цепей, кВт;

$T_{ав}$  – время аварийного ремонта, час.;

$m$  – число дополнительных изоляторов в гирлянде, шт.;

$K_0$  – стоимость одного изолятора, грн.;

$l_n$  – длина линии, км;

$l_{пр}$  – длина пролета, км;

$P_a$  – полные отчисления на эксплуатацию, о.е.;

$E_n$  – нормативный коэффициент эффективности о.е.

Оценочные расчеты показали, что в зависимости от конкретных условий ежегодный эффект может составлять от нескольких десятков до сотни тыс. грн.

Таким образом, увеличение числа изоляторов на одной из цепей в технически допустимых пределах снижает число одновременных отключений на 15–40%. При этом ежегодный экономический эффект достигает десятков тыс. грн. Поэтому данное мероприятие можно рассматривать как один из способов повышения надежности работы двухцепных линий электропередач.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Руководящие указания по защите от внутренних и грозových перенапряжений сетей 3-750 кВ. – Тр. НИИПТ. 1975. Вып. 21-22. С. 27-49
2. Базуткин В.В., Запороженко С.И. Оценки формы и вероятности и возникновения грозových волн, пробегающих на подстанции 110-750 кВ // Электричество. 1975. №1. С. 26-29.
3. Костенко М.В. Техника высоких напряжений. М.: «Высшая школа» 1973 – 528с.
4. Разевиг Д.В. Техника высоких напряжений. М.: Энергия. 1976.– 488с.
5. Перхач В.С. Теоретична електротехніка. Київ. «Вища школа». 1992.– 440с.
6. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / под ред. И.А. Баумштейна, М.В. Хомякова. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981.– 656с.