

УДК 621.311

НАВЕДЕННЫЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ГРОЗОЗАЩИТНЫХ ТРОСАХ

Савицкий Н.С.

Научный руководитель – д.т.н., профессор Короткевич М.А.

Грозозащитные тросы являются наиболее широко распространенным средством защиты воздушных линий напряжением 35 кВ и выше от прямых ударов молнии. Однако и по сей день ведутся споры об эффективности их применения на линиях электропередачи. В данной работе рассмотрены основные параметры грозозащитных тросов и особенности их эксплуатации, а также сделана попытка оценки эффективности применения тросов на воздушных линиях в условиях Республики Беларусь.

При проектировании ВЛ большое внимание следует уделять правильному выбору площади поперечного сечения грозозащитных тросов. Правильно выбранный трос не оборвется при сложных погодных условиях и не приведет к замыканию линии и другим неблагоприятным последствиям. Критерием выбора поперечного сечения тросов является обеспечение механической прочности троса при определенных нагрузках.

При расчете грозозащитного троса на механическую прочность можно пользоваться методом допускаемых напряжений. По этому методу вначале определяется напряжение σ_T в материале троса в грозовом режиме (температура +15°C, скорость ветра 10 м/с и отсутствие гололеда), при котором еще соблюдается допустимое расстояние $h_{пт}$ между тросом и проводом в середине пролета. σ_T определяется по следующему выражению:

$$\sigma_T = \frac{\gamma_T}{\frac{\gamma_{п}}{\sigma_{п}} + \frac{8(\Delta h - h_{пт})}{l^2}}; \quad (1)$$

где γ_T – удельная механическая нагрузка от действия собственного веса троса и горизонтальной нагрузки от давления ветра со скоростью 10 м/с на трос без гололеда; $\gamma_{п}$ – удельная механическая нагрузка от действия собственного веса провода и горизонтальной нагрузки от давления ветра со скоростью 10 м/с на провод без гололеда; $\sigma_{п}$ – напряжение в материале провода в грозовом режиме; Δh – разность высот точек подвеса провода и троса на опоре; l – длина пролета.

По приведенному выше выражению с учетом этих требований находят значение σ_T , после чего определяется напряжение в материале троса в грозовом режиме при трех различных режимах: минимальных температур, среднегодовых нагрузок и максимальных температур.

Допустимые токи КЗ по условиям термической стойкости определяются по выражению:

$$I_{доп} = \frac{(F_T \sqrt{A_T - A_0}) \cdot 10^{-3}}{\sqrt{t}} = \frac{72,8 F_T \cdot 10^{-3}}{\sqrt{t}}; \quad (2)$$

где F_T – площадь поперечного сечения троса, мм²; A_T – величина, зависящая от температуры троса после короткого замыкания (при $\tau=400$ °С $A_T = 0,6 \cdot 10^4 A^2 \cdot c/мм^2$); A_0 – величина, зависящая от температуры троса до короткого замыкания (при $\tau=25$ °С $A_0 = 0,07 \cdot 10^4 A^2 \cdot c/мм^2$); t – продолжительность действия тока короткого замыкания, с.

Крепление троса к металлическим и железобетонным промежуточным опорам линий 35—110 кВ осуществляется без изоляции троса. На линиях 220 кВ и выше на промежуточных и анкерных опорах и на анкерных металлических и железобетонных опорах

линий 35—110 кВ трос крепится через изолятор, при этом он присоединяется к устройству заземления наглухо или через искровой промежуток.

Для расчета токов короткого замыкания, протекающих через грозозащитный трос, а также для определения потерь энергии в тросе, необходимо составить комплексную схему замещения троса. Параметры этой схемы замещения и соотношения для их определения рассмотрим ниже.

Активное сопротивление участка троса длиной l определяется аналогично сопротивлению провода по выражению:

$$r_T = r_{0T} \cdot l; \tag{3}$$

где r_{0T} – удельное активное сопротивление троса.

Удельное индуктивное сопротивление троса зависит от количества тросов, подвешенных на опоре, а также от материала, из которого они изготовлены. При этом определяется сопротивление петли, образованной тросами и землей.

Для одиночного стального троса выражение для определения x_{0T} имеет вид:

$$x_{0T} = 0,145lg \frac{D_3}{R_T} + x_{0BH} \text{ [Ом/км]}; \tag{4}$$

где D_3 – глубина возврата тока в земле (для Республики Беларусь можно принять 1000 м); R_T – внешний радиус троса, 10^{-3} м; x_{0BH} – внутреннее индуктивное сопротивление троса, зависящее от проходящего по нему тока.

Если применяется одиночный сталеалюминиевый трос:

$$x_{0T} = 0,145lg \frac{D_3}{R_{T.Э.}} + 0,016 \text{ [Ом/км]}; \tag{5}$$

где $R_{T.Э.}$ – эквивалентный радиус сталеалюминиевого троса.

Под действием электромагнитного поля фазных проводов на грозозащитных тросах возникают наведенные напряжения, которые можно условно разделить на две составляющие – электростатическую и электромагнитную.

Напряжения фазных проводов (U_A, U_B, U_C) и наведенные напряжения на одном (U_{T1}) или двух (U_{T1}, U_{T2}) тросах связаны системой уравнений Максвелла:

$$\begin{cases} \underline{U}_A = \alpha_{11}\underline{q}_A + \alpha_{12}\underline{q}_B + \alpha_{13}\underline{q}_C; \\ \underline{U}_B = \alpha_{21}\underline{q}_A + \alpha_{22}\underline{q}_B + \alpha_{23}\underline{q}_C; \\ \underline{U}_C = \alpha_{31}\underline{q}_A + \alpha_{32}\underline{q}_B + \alpha_{33}\underline{q}_C; \\ \underline{U}_{T_1} = \alpha_{1T_1}\underline{q}_A + \alpha_{2T_1}\underline{q}_B + \alpha_{3T_1}\underline{q}_C; \\ \underline{U}_{T_2} = \alpha_{1T_2}\underline{q}_A + \alpha_{2T_2}\underline{q}_B + \alpha_{3T_2}\underline{q}_C, \end{cases} \tag{6}$$

где α_{ij} – потенциальные коэффициенты;

$\underline{q}_A, \underline{q}_B, \underline{q}_C$ – заряды фазных проводов.

Расчеты, произведенные по формуле (1.6) дали следующие значения наведенных напряжений: для линий 35 кВ – 5,1-6,5 кВ; для линий 110 кВ – 12,3-14,5 кВ; для линий 220 кВ – 22,6-34,5 кВ; для линий 330 кВ – 24,9-43,7 кВ; для линий 750 кВ – 75,1 кВ.

Наведенные электромагнитные напряжения зависят от протекающего по фазным проводам тока и определяются как:

$$\underline{E}_T = j0,145 \sum_{i=1}^3 I_i lg \frac{D_3}{D_{iT}} \text{ [В/км]}, \tag{7}$$

где I_i – сила тока в проводе i -й фазы линии, А ($i = 1, 2, 3$); D_{iT} – расстояние между проводом i -й фазы и тросом, м; D_3 – эквивалентная глубина прохождения обратного тока в земле (для территории Республики Беларусь может быть принята 1000 м).

Значения E_T лежат в пределах: $0,039I_1-0,054I_1$ для линий 110 кВ; $0,026I_1-0,046I_1$ для линий 220 кВ; $0,034I_1-0,041I_1$ для линий 330 кВ; $0,020I_1-0,034I_1$ для линий 750 кВ.

В грозозащитном тросе имеют место потери электрической энергии, которые вызывают его нагрев. Сильный нагрев троса может привести к нарушению допустимого габарита между тросом и фазными проводами и вызвать возникновение аварийной ситуации. В связи с этим необходимо обращать внимание на потери мощности в грозозащитных тросах еще на этапе проектирования, особенно при сильной загруженности линий.

Потери электрической энергии ΔW_T в грозозащитных тросах можно приближенно определить как:

$$\Delta W_T = \Delta P_T l_{\pi} \tau; \quad (8)$$

где ΔP_T – потери активной мощности в тросе, приходящиеся на 1 км длины, кВт/км; l_{π} – длина линии; τ – время потерь, ч (определяется из графика нагрузки линии).

Значения потерь электроэнергии в тросах сильно зависят от нагрузки линии и изменяются в пределах: $0,013-0,22$ кВт/км для линий 35 кВ; $0,013-0,31$ кВт/км для линий 110 кВ; $0,04-0,75$ кВт/км для линий 220 кВ; $0,054-0,78$ кВт/км для линий 330 кВ.

В настоящий момент тросы широко используются для организации каналов связи с помощью оптического кабеля. Оптические кабели могут быть встроенными в грозозащитный трос или же навиваться на него. Последние имеют существенный недостаток – в зимнее время они увеличивают гололедную нагрузку на грозозащитный трос, причем на тросах малого сечения (ТК8; ТК9,1) это увеличение составляет порядка 38-67%.

Далее была произведена оценка надежности линий, оснащенных грозозащитными тросами и без них в условиях Республики Беларусь. Для этого было определено число грозовых отключений по формулам:

для линий с тросами

$$n = n_1 + n_2 + n_3; \quad (9)$$

где n_1 – число отключений линии при прорыве молнии через тросовую защиту на провод и последующих перекрытиях изоляции с провода на опору; n_2 – количество отключений при ударах молнии в опору и перекрытиях изоляции с опоры на провод; n_3 – число отключений при ударе молнии в трос в середине пролета.

для линий без тросов

$$n_{б.т} = n'_1 + n_2 + n_4; \quad (10)$$

где n'_1 – количество отключений линии при прямых ударах молнии в провод и перекрытиях изоляции с провода на опору; n_4 – количество отключений вследствие индуктированных перенапряжений и перекрытия изоляции с провода на опору (учитывается для линий напряжением до 35 кВ).

При сравнении полученных значений оказалось, что число отключений для линий без тросов превышает аналогичный показатель для линий 110 кВ – в 1,73-1,93 раза; для линий 220 кВ – в 1,36-1,73 раза; для линий 330 кВ – в 1,24-1,61 раза.

На основе метода многоцелевой оптимизации было произведено сравнение целесообразности сооружения линий с грозозащитными тросами и без них.

Таблица 1- Значения критерия оптимизации E

| Значения ε варианта | Критерий оптимизации E для линий напряжением, кВ | | | | | |
|--|--|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| | 110 | | 220 | | 330 | |
| | с тросом | без троса | с тросом | без троса | с тросом | без троса |
| $\varepsilon_1=\varepsilon_2=\varepsilon_3$ (все цели равнозначны) | 0,90 | 0,97 | 0,90 | 0,98 | 0,95 | 0,98 |
| $\varepsilon_1=0,6$ $\varepsilon_2=0,2$ $\varepsilon_3=0,2$ (предпочтительнее минимум затрат) | 0,82 | 0,98 | 0,82 | 0,99 | 0,91 | 0,99 |
| $\varepsilon_1=0,6$ $\varepsilon_2=0,2$ $\varepsilon_3=0,2$ (предпочтительнее максимум надежности) | 0,94 | 0,98 | 0,94 | 0,99 | 0,97 | 0,99 |
| $\varepsilon_1=0,6$ $\varepsilon_2=0,2$ $\varepsilon_3=0,2$ (предпочтительнее сохранение коммутационного ресурса) | 0,66 | 0,55 | 0,66 | 0,56 | 0,63 | 0,57 |

Как видно из таблицы 1, очень значительную роль в выборе окончательного варианта играет то, какой цели мы хотим достичь прежде всего. При равноценности всех вышеперечисленных целей линии 110...220 кВ предпочтительнее делать без грозозащитного троса, в то же время для линий 330 кВ практически не имеет значения наличие или отсутствие грозозащитного троса. При первоочередности минимума капитальных затрат, конечно же, будет лучшим вариант сооружения линий без тросов, однако, опять же, на линиях 330 кВ преимущество не так очевидно. Линии с грозозащитными тросами могут быть более предпочтительны для обеспечения максимума надежности или сохранения коммутационного ресурса выключателей.

Литература

1. Короткевич, М. А. Монтаж электрических сетей/ М.А. Короткевич.– Минск: Вышэйшая школа, 2012.–512с.
2. Короткевич, М. А. Проектирование линий электропередачи. Механическая часть/ М.А. Короткевич.– Минск: Вышэйшая школа, 2010.–574с.
3. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения/ Под ред. И. А. Баумштейна, С. А. Бажанова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 768 с.