

УДК 621.311

Совершенствование защиты линий связи от влияния токов в высоковольтной сети

Ю.М. Невретдинов, А.С. Карпов, Г.П. Фастий

Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН;
Апатитский филиал МГТУ, кафедра электроэнергетики

Аннотация. Рассмотрены вопросы электромагнитной совместимости линий связи с высоковольтной сетью. Показана необходимость учета распределения тока замыкания на землю для выделения составляющей тока во влияющей линии и изменение потенциалов контуров заземления на концах линии связи. Рассчитано распределение напряжения на изоляции кабеля по трассе для случаев срабатывания защитных устройств и обрывов жил. Разработан вариант совершенствования защиты кабельных линий связи с включением токоограничивающих резисторов.

Abstract. Electromagnetic compatibility questions of communication lines with a high-voltage network have been examined. Necessity of distribution account of short circuit current on the ground for allocation current component in an influencing line and change of grounding contours potentials on the ends of the communication line has been shown. Distribution of a cable isolation voltage on a line for cases of operation accident protection devices and breakages of veins has been calculated. The variant of cable communication lines' protection perfection with inclusion of current-limiting resistors has been developed.

1. Введение

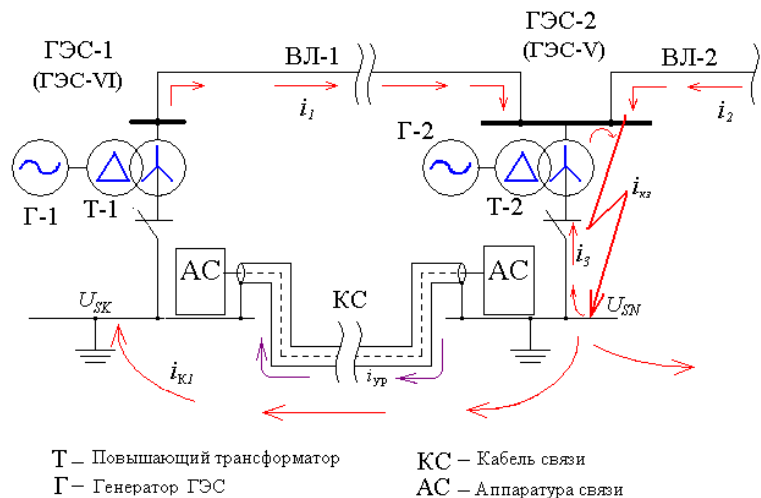
Подземные магистрали, в том числе и кабели связи, контроля и автоматики, расположенные вблизи элементов протяженной высоковольтной сети, подвержены ее электромагнитным влияниям как в рабочих, так и в аварийных режимах. Наибольшую опасность представляет влияние аварийных токов при замыканиях на землю вблизи электростанций, имеющих, как правило, заземление нейтрали повышающих трансформаторов. В частности, это относится к магистралям, проложенным между электростанциями. При замыканиях в высоковольтной сети вблизи открытого распределительного устройства (ОРУ) энергосистемы, кроме действия магнитного момента токов замыкания по контуру провод-земля на подземную магистраль, действует разность потенциалов контуров заземления электростанций. Защита концевой аппаратуры связи от перенапряжений осуществляется защитными разрядниками.

2. Распределение токов замыкания на землю

На рис. 1 показана эквивалентная схема распределения тока замыкания на землю при соединении ГЭС одного каскада воздушной линией электропередач (ЛЭП) (ВЛ-1) подземной коммуникацией (КС).

На рис. 1 рассмотрен случай замыкания в ОРУ ГЭС-2. Полный ток замыкания i_{K3} включает составляющие от генераторов Г-2 ГЭС-2 (i_3) и от внешних источников i_1 и i_2 .

Рис. 1. Эквивалентная схема распределения тока короткого замыкания на ГЭС-2



Ток i_1 от генераторов Г-1 ГЭС-1, поступающий по линии ВЛ-1, протекает частично через контур ГЭС-1 i_1 и по элементам кабеля связи i_{yp} (уравнительный ток).

Как видно, при замыкании на землю в ОРУ ГЭС-2 потенциал контура ГЭС-2 изменяется за счет стекания части тока i_{K3} в землю и определяется как $i_{K1} + i_2$. Потенциал контура ГЭС-1 меняется на противоположный за счет стекания составляющей тока замыкания i_{K1} , в противоположном направлении по отношению тока в контуре ГЭС-2. Таким образом, магистраль КС оказывается под влиянием тока в линии ВЛ-1 по контуру провод-земля и уравнительного тока i_{yp} , определяемого разностью напряжений на контурах концевых ГЭС.

В настоящей статье электромагнитное влияние на подземные магистрали рассмотрено на примере линии (КС), связывающей две ГЭС Пазского Каскада ГЭС-V и ГЭС-VI. Схема участка высоковольтной сети аналогична приведенной на рис. 1.

По данным измерений, сопротивление растеканию контуров ГЭС КПГЭС в зимнее время R_3 (ГЭС-V) = 4,0 Ом и R_3 (ГЭС-VI) = 1,5 Ом. Специфика распределения составляющих токов замыкания подтверждена результатами экспериментальных исследований на ГЭС Пазского каскада (Невретдинов и др., 2006).

С учетом сложной картины распределения токов короткого замыкания выполнены расчеты его составляющих, которые протекают через влияющую линию ВЛ-1 (i_1) и через контуры ГЭС-V ($i_2 + i_{K1}$) и ГЭС-VI (i_{K1}) в землю. При этом на смещение потенциала контура ГЭС-VI влияет только составляющая тока замыкания, обусловленная генераторами этой ГЭС. Составляющая тока замыкания i_3 от ЭДС генератора ГЭС-V изменения потенциала контура ГЭС-V (U_{SN}) относительно удаленной земли не вызывает, т.к. эта составляющая тока протекает по элементам контура от точки замыкания до точки заземления нейтралей повышающих трансформаторов ГЭС-V. Кроме того, учтено, что на смещение потенциала контура ГЭС-V влияет составляющая тока (i_2) от внешних источников, подключенных к ОРУ 110 кВ через линию ВЛ-2. Расчетное распределение составляющих тока замыкания в ОРУ 110 кВ ГЭС-V приведено в таблице.

Оценка напряжения на контурах ГЭС-V и ГЭС-VI и напряжения на КС:

$$U_{SN} = 1,14 \text{ А} \cdot 1,5 \text{ Ом} = 1,71 \text{ кВ}; \quad U_{SK} = 1,89 \text{ А} \cdot 4 \text{ Ом} = 7,56 \text{ кВ}; \quad U_{KC} = U_{SN} + U_{SK} \approx 9,3 \text{ кВ}.$$

Таблица. Действующие значения и фазы, составляющих тока замыкания на землю в ОРУ 110 кВ ГЭС-V

Наименование точки замыкания	Полный ток замыкания на землю (i_{K3}), кА	Составляющие тока замыкания		
		В т. ч. от генераторов ГЭС-V (i_3), кА	От внешней сети, $i_1 + i_2$, кА	В т. ч. от соседней ГЭС-VI (i_1), кА
ОРУ-110 кВ ГЭС-V	3,53	1,64 $\angle -1,09^\circ$	1,89 $\angle 0,92^\circ$	1,14 $\angle 0,95^\circ$

Примечание: \angle – знак угла.

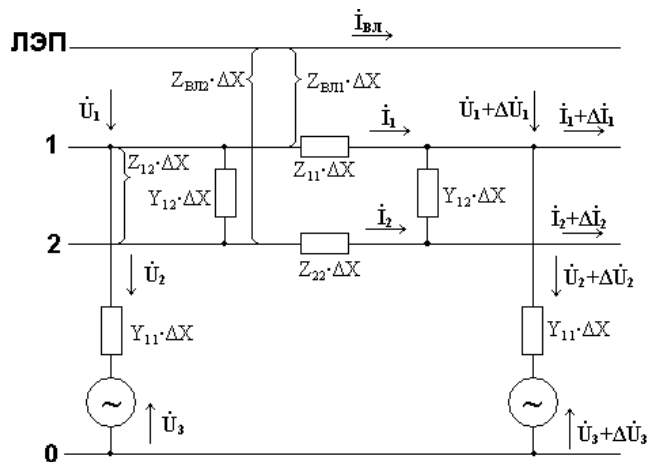
3. Методика расчета распределения напряжения на элементах линии связи

Для анализа электромагнитного влияния высоковольтной сети на кабель связи при возникновении замыкания вблизи ОРУ 110 кВ ГЭС-V составлена схема замещения, в которой возможен учет изменения потенциалов земли и оболочки на концах кабельной линии.

Схема замещения элементов длиной ΔX рассматриваемой системы: влияющая ЛЭП, кабель связи и земля, представлена на рис. 2.

Рис. 2. Схема замещения элемента кабельной линии связи, подверженной индуктивному и гальваническому влиянию высоковольтной сети (Костенко и др., 1972)

- 1 – оболочка (экран) кабеля;
- 2 – жила кабеля;
- 0 – земля вблизи кабельной линии



На схеме представлены оболочка и жила подземного кабеля связи (1 и 2 соответственно), находящиеся под электромагнитным воздействием воздушной линии электропередач (ЛЭП), по которой протекает ток $I_{БЛ} \cdot Z_{11} \cdot \Delta X$ и $Z_{22} \cdot \Delta X$ – собственные полные сопротивления элементов оболочки и жилы кабеля; $Z_{12} \cdot \Delta X$, $Z_{БЛ1} \cdot \Delta X$ и $Z_{БЛ2} \cdot \Delta X$ – взаимные сопротивления между элементами рассматриваемой системы; $Y_{11} \cdot \Delta X$ – комплексная проводимость утечки элемента оболочки по отношению к земле; $Y_{12} \cdot \Delta X$ – комплексная проводимость между элементами оболочки и жилы кабеля.

В соответствии со схемой замещения для определения токов и напряжений на кабеле составлена система неоднородных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} -\frac{dU_1}{dx} = Z_{11} \cdot I_1 + Z_{12} \cdot I_2 + Z_{БЛ1} \cdot I_{БЛ} \\ -\frac{dU_2}{dx} = Z_{12} \cdot I_1 + Z_{22} \cdot I_2 + Z_{БЛ2} \cdot I_{БЛ} \\ -\frac{dI_1}{dx} = (Y_{11} + Y_{12})U_1 - Y_{12} \cdot U_2 - Y_{11} \cdot U_3 \\ -\frac{dI_2}{dx} = -Y_{12} \cdot U_1 + Y_{12} \cdot U_2 \end{cases}$$

где U_1, U_2, U_3 – потенциалы оболочки, жилы кабеля и земли вблизи кабеля соответственно.

Граничными условиями при решении системы уравнений является напряжение "оболочка – земля" по концам: $U_1(x=0) = U_{SN}$ и $U_1(x=l) = U_{SK}$, так как оболочка кабеля заземлена с двух концов.

В расчетах принято следующее распределение потенциала земли вблизи кабеля, обусловленное протекающей через землю составляющей $i_{кз}$

$$U_3(x) = U_{SK} \cdot \left(\frac{0,5}{l_K - x} \right)^{1,4} + U_{SH} \cdot \left(\frac{0,5}{x} \right)^{1,4}$$

где U_{SH} и U_{SK} – потенциалы контуров в начале и в конце кабеля; l_K, x – длина кабеля и расстояние от точки замыкания (ОРУ ГЭС-V).

Принято, что в пределах контура потенциал, относительно удаленной земли, примерно одинаков и для контуров определяется из выражений:

$$U_{SH} = I_H \cdot Z_{SH} \text{ и } U_{SK} = I_K \cdot Z_{SK}$$

где I_H, I_K – составляющие токов замыкания в контурах ГЭС, стекающие в землю; Z_{SH}, Z_{SK} – сопротивления контуров заземления в начале и в конце кабельной линии. Это допущение применимо, так как точка заземления оболочки кабеля связи удалена от точки заземления.

Собственные параметры элементов схемы замещения могут быть определены из системы трансцендентных уравнений:

$$\begin{cases} Z_{11} = Z_1 + Z_e \\ Y_{11} = \left[Y_1^{-1} + \frac{1}{\pi \cdot \delta_3} \cdot \ln \frac{1,12}{\Gamma \cdot a} \right]^{-1} \\ \Gamma = \sqrt{Z_{11} \cdot Y_{11}} \end{cases}$$

где Z_1 – собственное сопротивление оболочки;

$$Z_e = \frac{\gamma \cdot \omega \cdot \mu_0}{2\pi} \ln \frac{1,85}{a \cdot (\gamma^2 + \Gamma^2)}$$

$\gamma^2 = j \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot \delta_3$; δ_3 – удельная проводимость земли; ω – угловая частота; Y_1 – проводимость изоляции оболочки на землю, a – эквивалентный радиус оболочки и брони кабеля. Здесь и далее параметры схемы замещения определены на единицу длины:

$$Z_{22} = \left[\frac{Z_{22(1)}}{n} + (\pi^2 \cdot f + j \cdot 29 \cdot f \cdot \lg \frac{D}{r_{cp}}) \cdot 10^{-7} \right]$$

где $Z_{22(1)}$ – внутреннее сопротивление одной жилы; r_{cp} – средний геометрический радиус пучка жил; n – число жил; D – глубина протекания эквивалентного тока в земле; f – промышленная частота 50 Гц.

$$D = \frac{2,1}{\sqrt{f \cdot \delta_3 \cdot 10^{-3}}}$$

Взаимные параметры:

$$Z_{12} = Z_{11} - R_0; \quad Y_{12} = G_{12} + j \cdot \omega \cdot C_{12}$$

где R_o – сопротивление оболочки и брони постоянному току; G_{12} , C_{12} – активная проводимость и емкость изоляции между жилами и оболочкой.

4. Результаты расчетов распределения напряжения на линии связи

Решение системы нелинейных дифференциальных уравнений выполнено в среде MathCad 14. В расчетах граничные условия определены потенциалами контуров ГЭС, а контроль достоверности расчетов выполнен путем сопоставления экспериментальных исследований и результатов расчетов для условий проведения измерений.

Полученные характеристики распределения напряжения для кабеля связи (ГЭС-V – ГЭС-VI), при коротком замыкании вблизи ОРУ 110 кВ ГЭС-V без учета срабатывания защитных разрядников приведены на рис. 3. Как видно, модули напряжений оболочки на концах линии достигают $|U_{SN}| = 7,65$ кВ на стороне ГЭС-V и $|U_{SK}| = 1,71$ кВ на стороне ГЭС-VI. С учетом направлений токов в контурах ГЭС (см. рис. 1) напряжения U_{SN} и U_{SK} имеют противоположные знаки.

Напряжение на концевых аппаратах связи с входным сопротивлением R_a превышает 2 кВ.

При срабатывании защитных устройств между жилой и оболочкой кабеля происходит изменение граничных условий на концах кабеля с увеличением напряжения на изоляции жила-оболочка на трассе. На рис. 4 дано сопоставление распределения напряжения для следующих вариантов: срабатывания защитных разрядников (ЗР): без срабатывания ЗР (кривая 1), с учетом срабатывания ЗР на ГЭС-V (кривая 2) и на противоположном конце ГЭС-VI (кривая 3). Как видно, при срабатывании ЗР на одной стороне напряжение на противоположном конце увеличивается более чем на 3 кВ.

Срабатывание защитных устройств по обоим концам приводит к увеличению напряжения на трассе до 3,2 кВ. Таким образом, срабатывание защитных устройств приводит к значительному увеличению напряжения на изоляции кабеля на трассе с увеличением вероятности ее перекрытия.

5. Совершенствование защиты линий связи от влияния высоковольтной сети

Для уменьшения уровней перенапряжений разработан вариант защиты с ограничением снижения напряжения на жилах после срабатывания ЗР. Ограничение выполнено с помощью токоограничивающих резисторов, включенных последовательно с основными ЗР. Параллельно полученному устройству целесообразно включить дополнительные ЗР для ограничения перенапряжений на концевых аппаратах в случае превышения расчетных токов замыкания. На рис. 5 приведены характеристики распределения напряжений на изоляции жил кабеля связи при замыканиях в ОРУ-110 кВ ГЭС-V для вариантов сопротивления токоограничивающих резисторов ($R_{ЗУ}$) 10 Ом и 35 Ом.

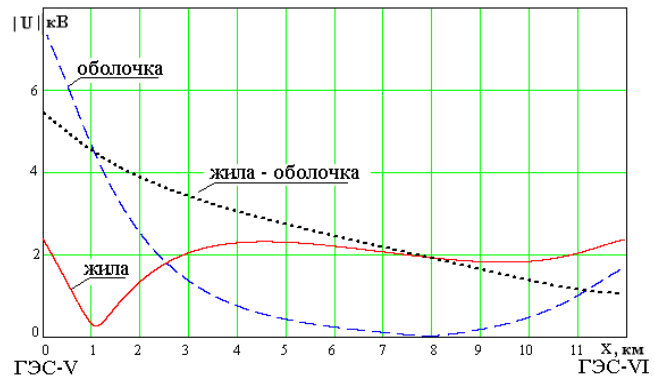


Рис. 3. Распределение напряжения на кабеле связи (ГЭС-V – ГЭС-VI) при замыкании на ГЭС-V

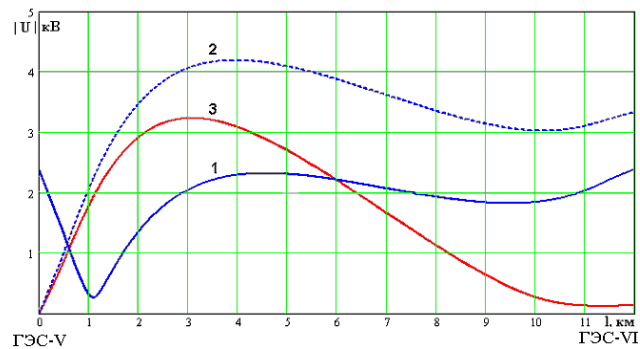


Рис. 4. Распределение напряжения на изоляции жил кабеля связи по его длине при замыканиях в ОРУ-110 кВ ГЭС-V

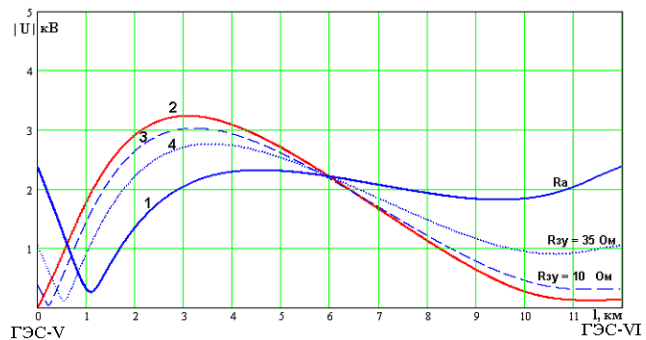


Рис. 5. Распределение напряжения на изоляции кабеля связи по его длине при замыканиях в ОРУ-110 кВ ГЭС-V с токоограничивающими резисторами в устройствах защиты ($R_{ЗУ}$)

Как видно на рис. 5, кривые распределения напряжения на изоляции КС с токоограничивающими резисторами $R_{3У}$ в устройствах защиты (кривые 3 и 4) располагаются между кривыми соответствующими отсутствию защиты (кривая 1) и с защитой без резисторов (кривая 2). При этом с увеличением сопротивления $R_{3У}$ напряжение на изоляции кабеля по трассе уменьшается, но одновременно уменьшается напряжение на концевых устройствах.

Из представленных на рис. 5 зависимостей следует, что в защитных устройствах в цепь разрядников целесообразно включать резистор от 10 до 35 Ом. Мощность резисторов в цепи разрядников должна соответствовать пропускной способности разрядников по току. Напряжение срабатывания дополнительной защиты должно быть не выше 380 В. Включение дополнительного резистора в цепь защиты позволяет снизить напряжение в наиболее опасных точках трассы линий связи на 200÷400 В и ограничить токи в жилах кабелей. Как показали исследования, наибольший эффект могут дать резисторы с нелинейной вольтамперной характеристикой. Однако применение современных варисторов невозможно в связи с тем, что ток в жилах может достигать 20 А, и длительность его воздействия на резисторы $R_{3У}$ ограничится временем срабатывания релейной защиты.

6. Выводы

Показана необходимость учета распределения составляющих тока короткого замыкания для выделения токов, протекающих во влияющей линии и в контурах ГЭС. Это позволяет повысить точность определения напряжений контуров, к которым подключен кабель связи. Электромагнитное влияние высоковольтной сети в аварийных режимах проявляется в повышении напряжения не только на аппаратуре связи, но и на изоляции кабеля связи.

Срабатывание современных защитных разрядников вызывает значительное повышение напряжения на изоляции жила – оболочка на трассе кабеля связи на удалении от точки замыкания. Это повышает вероятность повреждения изоляции кабеля связи с пережиганием жил и повреждениями изоляции в точках их разрыва.

Разработан вариант совершенствования защиты кабельных линий связи с включением токоограничивающих резисторов последовательно с основными защитными разрядниками.

Литература

- Костенко М.В., Гайдулин Р.А., Зархи И.М.** Расчет опасных влияний на кабели связи однофазных коротких замыканий в высоковольтной сети. *Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт*, № 1, с.104-111, 1972.
- Невретдинов Ю.М., Фастий Г.П., Кабеев И.Е., Карпов А.С.** Сборник докладов девятой Российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности ЭМС-2006. *СПб., ВИТУ*, с.146-149, 2006.