

ЗАЩИТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОСТРОВА ОЛЬХОН

*Шалин А.И., Сарин Л.И., Хабаров А.М., Кондранина Е.А.
(ООО «ПНП БОЛИД», Новосибирск)*

Введение

Осенью 2005 г. была введена в эксплуатацию система электроснабжения острова Ольхон напряжением 35/10 кВ. Остров Ольхон располагается в двух километрах от берега озера Байкал примерно в 300 километрах от Иркутска.

Упрощенная схема электроснабжения острова приведена на рис.1.

От подстанции Еланцы (110/35/10 кВ) до берега Байкала по материке проложена воздушная ЛЭП 1 напряжением 35 кВ общей длиной 52 км на опорах в габаритах 110 кВ. Транспозиция проводов фаз по трассе ЛЭП отсутствует. По тем же опорам проложена вторая цепь (10 кВ). Неподалёку от берега Байкала к цепи 10 кВ подключены существующие воздушные линии 10 кВ общей протяжённостью примерно 50 км.

Между материком и островом по дну озера проложено два параллельных кабеля фирмы Ribok длиной около 2 километра каждый (ЛЭП2).

По острову Ольхон до подстанции Хужир (35/10 кВ) проведена двухцепная воздушная ЛЭП - ЛЭП 3 и ЛЭП 4 длиной 32 км. Линия выполнена на опорах в габаритах 110 кВ. Транспозиция проводов фаз по трассе ЛЭП отсутствует. Грунт по трассе ЛЭП преимущественно скальный.

От одной из цепей этой ЛЭП в 720 метрах от берега имеется короткая одноцепная отпайка до паромной переправы, где установлен понижающий трансформатор 35/0,4 кВ.

В нейтрали стороны 35 кВ питающего трансформатора на подстанции Еланцы установлен заземляющий резистор сопротивлением 4 000 Ом производства ООО «ПНП БОЛИД».

Подстанция Хужир – двухтрансформаторная (трансформаторы мощностью 4,0 МВА «сухие» с выведенными нейтральными на стороне 35 кВ). В нейтральных сторонах 35 кВ питающих трансформаторов на подстанции Хужир установлены заземляющие резисторы сопротивлением по 8 000 Ом производства ООО «ПНП БОЛИД».

Для подключения защиты от однофазных замыканий на землю установлены трансформаторы напряжения TV 1 на подстанции Еланцы, TV₂ и TV₂ – в начале кабельных линий, в дальнейшем возможна установка трансформаторов TV 3 и TV 4 - в начале каждой цепи воздушной ЛЭП (ЛЭП 3 и ЛЭП 4) на острове Ольхон.

Установлены трансформаторы тока нулевой последовательности на каждой цепи кабеля перед его «входом» под воду ТА 1, ТА 2.

Для отделения кабелей от остальной части схемы на «входе» в воду и «выходе» из воды предусмотрены разъединители.

На острове Ольхон по трассе линий 35 кВ имеются участки со скальным грунтом, для которого характерны большие переходные сопротивления в месте замыкания на землю при обрыве фазного провода ЛЭП.

Прокладка дорогостоящих кабелей 35 кВ по дну озера привела к проблеме, связанной с их ремонтом в случае повреждения. Каждая жила кабеля имеет свою медную оболочку, что существенно снижает вероятность возникновения по их трассе междуфазных коротких замыканий. Основным видом повреждения в них – однофазные замыкания на землю (ОЗЗ).

Защита от ОЗЗ

В связи с большой опасностью для кабелей перенапряжений, связанных с ОЗЗ, было принято решение выполнить защиту от ОЗЗ на подстанции Еланцы с действием на отключение.

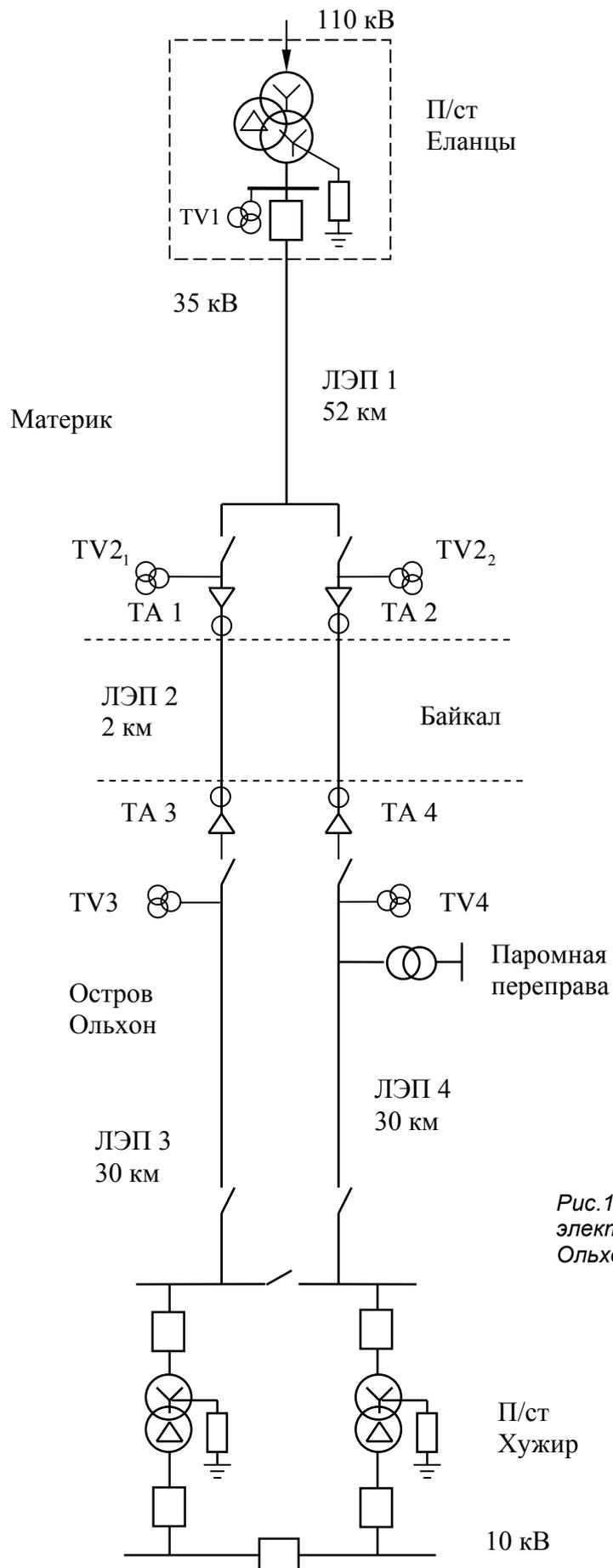


Рис.1. Упрощенная схема электроснабжения острова Ольхон

Выбор типов устройств защиты

Поскольку питающая линия ЛЭП1 одна, принято решение установить на ней защиту от ОЗЗ, реагирующую на напряжение нулевой последовательности. На подстанции Еланцы установлено два комплекта такой защиты: основной комплект присоединён к однофазному трансформатору напряжения, включённому параллельно заземляющему резистору R1 (рис.2). Резервный комплект присоединён к трёхфазной группе трансформаторов напряжения, установленных на шинах 35 кВ питающей подстанции. Оба комплекта выполнены на микропроцессорных терминалах типа Р-142 фирмы AREVA.

Выбор уставок защиты от ОЗЗ

Уставки защиты должны быть выбраны так, чтобы:

- защита не срабатывала от небалансов, которые могут появиться в сети при отсутствии в ней ОЗЗ;
- защита срабатывала при ОЗЗ на воздушной ЛЭП при падении провода на грунт и возникновении большого переходного сопротивления.

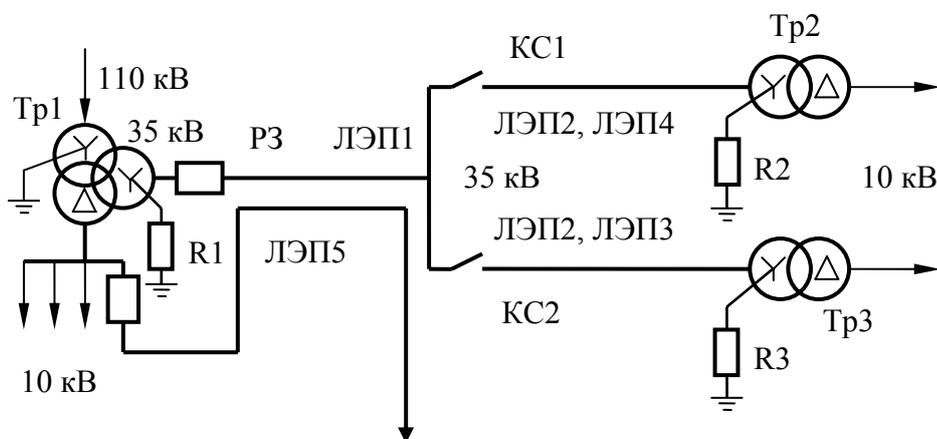


Рис.2. Расчётная схема сети

Анализ показал, что удовлетворить сразу обоим указанным требованиям весьма непросто. Ниже рассмотрены основные положения по выбору уставок и проверке чувствительности защит. Расчётная схема сети приведена на рис.2.

Небалансы защиты от ОЗЗ

1. Небаланс, связанный с разными ёмкостями фаз воздушных ЛЭП относительно земли $U_{нб.см.н}$

Расположение фазных проводов воздушных ЛЭП в рассматриваемом случае - вертикальное: один провод над другим, а над ними – провод третьей фазы. В результате, как показали расчёты, максимальное различие фазных ёмкостей относительно земли (между верхней и нижней фазой) составило около 20%. Это привело к смещению нейтрали (небалансу), определяемому по следующему выражению:

$$\bar{U}_N = \frac{\bar{U}_A \cdot \bar{Y}_A + \bar{U}_B \cdot \bar{Y}_B + \bar{U}_C \cdot \bar{Y}_C}{\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C + \bar{Y}_N}, \quad (1)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \bar{Y}_A &= j\omega C_A; \\ \bar{Y}_B &= j\omega C_B; \\ \bar{Y}_C &= j\omega C_C; \\ \bar{Y}_N &= \frac{1}{R_N}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В (2) C_A, C_B, C_C - ёмкости относительно земли фаз А, В и С соответственно; R_N - общее сопротивление всех заземляющих резисторов, включённых в нейтраль трансформаторов.

Включённые в нейтраль сторон 35 кВ трансформаторов заземляющие резисторы R1, R2, R3 (рис.2) существенно снизили рассматриваемую составляющую небаланса, но из-за отсутствия транспозиции проводов ЛЭП она составила 2,2% от номинального напряжения. Для того, чтобы «симметризовать» сеть, было предложено выполнить транспозицию проводов «на шинах», т.е. после развилки на ЛЭП2 и ЛЭП3 расположить провода в фазах иначе, чем на ЛЭП1. Это предложение было принято и реализовано на практике. При одинаковом расположении проводов в ЛЭП2 и ЛЭП3 небаланс снизился до 1,2%. Если же расположить провода во всех трёх ЛЭП по-разному, то рассматриваемая составляющая небаланса составит примерно 0,4%. Однако при этом следует помнить, что одна из ЛЭП2 или ЛЭП3 может быть длительно отключена и тогда в расчётах придётся принимать небаланс порядка 1,44% (эта величина была рассчитана для случая отключения одной из ЛЭП2, ЛЭП3).

2. Небаланс, вызванный влиянием ЛЭП5 $U_{нб.ЛЭП10}$

Расчёты показали, что при возникновении ОЗЗ в сети 10 кВ за счёт межцепных ёмкостей между линиями ЛЭП1 и ЛЭП5, размещённых на общих опорах, в сети 35 кВ нейтраль дополнительно сместится (появится небаланс). На рис.2 показаны учитываемые при расчёте ёмкости линий ЛЭП1 и ЛЭП5, а на рис.3 приведена схема замещения, в соответствии с которой может быть определена рассматриваемая составляющая небаланса.

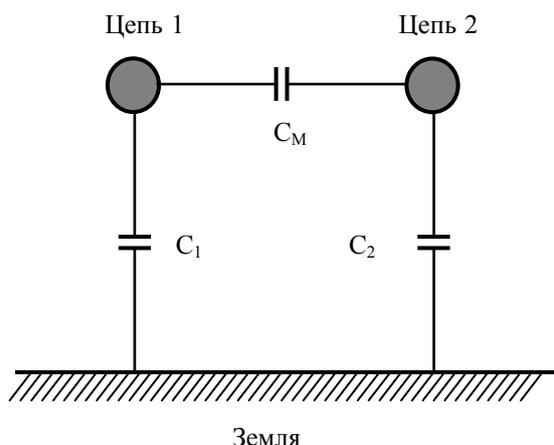


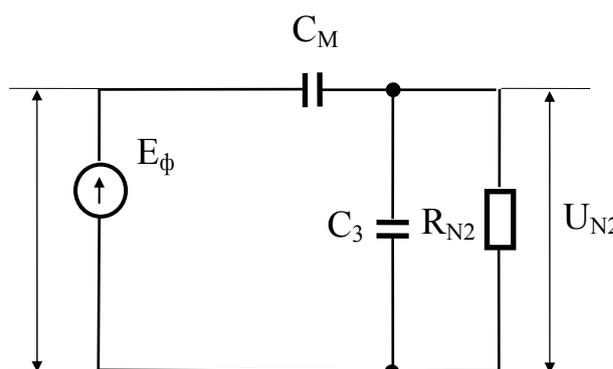
Рис.4. Расчётная схема для определения небаланса, вызванного влиянием ЛЭП5 U_{N1}

На рис.4 E_ϕ - фазная ЭДС в месте замыкания на землю в сети 10 кВ; C_M - суммарная межфазная ёмкость между цепями 10 кВ и 35 кВ линий ЛЭП1 и ЛЭП5; C_3 - суммарная ёмкость трёх фаз относительно земли в сети 35 кВ; R_{N2} - результирующее сопротивление заземляющих резисторов в сети 35 кВ.

Значения рассматриваемой составляющей небаланса U_{N2} нетрудно рассчитать в соответствии с рис.4. Если замыкание на землю в сети 10 кВ возникает при полностью

Рис.3. Учитываемые в расчёте ёмкости

На рис.3 C_1 - ёмкость относительно земли трёх фаз линии ЛЭП1; C_M - межцепная ёмкость между цепями (всех трёх фаз) 35 кВ (ЛЭП1) и 10 кВ (ЛЭП5); C_2 - ёмкость трёх фаз сети 10 кВ относительно земли.



включённой сети 35 кВ, то «сдвиг нейтрали» сети 35 кВ составит примерно 2,75% фазного напряжения. Если ОЗЗ в сети 10 кВ возникнет при отключении одной из ЛЭП2, ЛЭП3, то «сдвиг нейтрали» составит 4,3% от фазного.

3. Небаланс, вызванный неидентичностью характеристик фаз трансформатора напряжения $U_{нб.нес.ТН}$

Практические замеры небалансов на выводах соединённых по схеме «разомкнутый треугольник» обмоток трансформаторов напряжения 35 кВ показывают, что у большинства трансформаторов напряжение небаланса, вызванного неидентичностью фаз, не выходит за пределы 1-1,5 вольта, что соответствует 1-1,5% первичного фазного напряжения.

В основном комплекте защиты этот небаланс будет отсутствовать, поскольку напряжение нулевой последовательности здесь снимается непосредственно с нейтрали силового трансформатора.

В резервном комплекте этот небаланс будет присутствовать и от него защиту надо будет отстроить.

4. Небаланс, вызванный несимметрией фазных нагрузок $U_{нб.нагр}$

В рассматриваемой сети отсутствуют нагрузки, имеющие непосредственную связь с «землёй», поэтому небаланс, вызванный неравенством фазных токов таких нагрузок, не рассматриваем. Однако, заземляющие резисторы, включённые в нейтрали понижающих трансформаторов Тр2, Тр3, могут вызвать в защите сети 35 кВ дополнительную составляющую небаланса. Это связано с тем, что из-за несимметрии нагрузок в сети 0,4 кВ могут возникнуть разные токи в фазах сети 10 кВ. Трансформируясь в сеть 35 кВ, эти токи могут привести к смещению нейтрали 35 кВ относительно земли. Обычно такое смещение не приводит к небалансу по напряжениям и токам нулевой последовательности в сети 35 кВ, однако, наличие заземляющих резисторов в нейтралях понижающих трансформаторов Тр1 и Тр2 приводит к тому, что смещение их нейтралей приводит к появлению дополнительного небаланса токов и напряжений нулевой последовательности. Для того чтобы рассчитать эту составляющую небаланса, необходимо знать разницу в нагрузках фаз. На стадии проектирования эти данные отсутствовали. Предварительно значение рассматриваемой составляющей небаланса было принято равным 2,5% фазного напряжения. В процессе эксплуатации значения небаланса в различных режимах должны быть уточнены за мерами реальных величин.

Расчёт уставок защиты от замыканий на землю на подстанции Еланцы

Уставка по напряжению защиты от ОЗЗ определяется следующим образом:

$$U_{ср, \%} = k_n U_{нб, \%}, \quad (3)$$

где k_n - коэффициент запаса, величина которого может быть принята равной 1,2-1,3;

$$U_{нб, \%} = U_{нб.см.н.} + U_{нб.ЛЭП10} + U_{нб.нагр} + U_{нб.нес.ТН}. \quad (4)$$

При выборе уставки для основного комплекта защиты величину $U_{нб.нес.ТН}$ учитывать не следует;

$$U_{ср1} = U_{\phi} \cdot U_{ср, \%} / 100, \quad (5)$$

где U_{ϕ} - фазное напряжение.

Уставка защиты по времени была выбрана равной одной секунде для того, чтобы согласовать по селективности релейную защиту, установленную на питающей подстанции, и селективную сигнализацию, установленную на развилке кабелей.

Проверка чувствительности защиты

Выше отмечалось, что в рассматриваемом случае воздушные линии проложены по территории, для которой характерны участки с высоким удельным сопротивлением грунта (скальный грунт). Кроме того, зимой возможно падение провода на снег, что также приводит к появлению в месте ОЗЗ большого переходного сопротивления.

В [1] предлагается определять напряжение нулевой последовательности $3U_0$ при ОЗЗ через переходное сопротивление R_{II} следующим образом:

$$3U_0 = b \cdot 3U_{\phi}, \quad (6)$$

где b - коэффициент полноты замыкания.

В соответствии с [1] комплексное значение коэффициента b может быть определено по следующему выражению:

$$\bar{b} = \frac{1}{R_{II} \left(j\omega C_{\Sigma} + \frac{1}{\bar{Z}_H} \right) + 1}, \quad (7)$$

где R_{II} - значение переходного сопротивления в месте ОЗЗ; C_{Σ} - суммарная ёмкость сети; \bar{Z}_H - сопротивление, через которое нейтраль сети соединена с землёй.

Путём несложных преобразований можем найти модуль b величины \bar{b} :

$$b = \frac{1}{\sqrt{(1 + R_{II} Y_R)^2 + (R_{II} Y_C)^2}}, \quad (8)$$

где $Y_R = \frac{1}{R_N}$; Y_C - ёмкостная проводимость сети.

Общее сопротивление заземляющих резисторов в рассматриваемом случае равнялось 2 кОм, суммарный расчётный ёмкостный ток в месте ОЗЗ в полной схеме сети – $I_C = 19,7$ А.

Учтя, что

$$Y_C = 3\omega C = \frac{I_C \sqrt{3}}{U_{НОМ}}, 1/Ом, \quad (9)$$

в соответствии с (8) легко определить величину b для данной конкретной сети при различных значениях переходного сопротивления R_{II} .

Величина b тесно связана с расчётным коэффициентом чувствительности защиты k_{ϕ} . Защита перестанет чувствовать ОЗЗ при $b \leq \frac{1}{k_{\phi}}$. Если принять в соответствии с [2]

значение нормируемого коэффициента чувствительности равным 2,0, то в рассматриваемом случае защита будет чувствовать ОЗЗ с переходным сопротивлением не больше 1,3 кОма. Если же в соответствии с [3] принять $k_{норм} = 1,5$, то предельное переходное сопротивление, при котором защита ещё будет ощущать ОЗЗ, составит примерно 0,7 кОма.

Достаточна ли такая чувствительность защиты для рассматриваемого объекта? В [4] сказано, что в одном из опытов ОЗЗ на воздушной ЛЭП в сети 35 кВ было отмечено переходное сопротивление порядка 5,0 кОм. Эти данные подтверждаются в публикациях других авторов. В результате можно прийти к выводу, что предлагаемые в [2, 3] нормируемые коэффициенты чувствительности могут не обеспечить необходимой чувствительности защиты воздушных ЛЭП от ОЗЗ на рассматриваемом объекте.

В соответствии с описанным выше уставка по напряжению для основного комплекта защиты, установленного на питающей подстанции, была принята равной 12% фазного напряжения, что соответствует предельному переходному сопротивлению,

равному 7,0 кОм. Уставка резервного комплекта с учётом дополнительного небаланса, вызванного неидентичностью фаз измерительного трансформатора напряжения составила 14%, что соответствует предельному значению R_{II} , равному 6,0 кОм.

В принципе можно представить себе ситуацию (зима, сухой снег), когда переходное сопротивление превысит расчётные значения. Каков же выход из создавшегося положения? Ясно, что невозможно во всех реальных случаях обеспечить чувствительность защиты от ОЗЗ, реагирующей на токи и напряжения нулевой последовательности, к замыканиям на землю, сопровождающимся значениями R_{II} в десятки килоом. В то же время лежащий на земле провод линии 35 кВ, находящийся под напряжением, может представлять большую опасность для туристов и других людей, которые могут оказаться в районе трассы ЛЭП.

Установка защиты от обрывов, реагирующей на ток обратной последовательности, не всегда эффективна на ЛЭП, имеющих малые токи нагрузки в нормальном режиме работы, как это имеет место на рассматриваемом силовом объекте.

Удачное решение предлагаемой задачи имеется в принятой к установке защите от ОЗЗ типа P-142 фирмы AREVA. Здесь есть специальная опция обнаружения обрыва проводов воздушных ЛЭП. Защита содержит элемент, который измеряет отношение токов обратной последовательности и прямой последовательности (I_2 / I_1). Оно будет меняться в меньшей степени, чем ток обратной последовательности, так как это отношение почти неизменно при изменении тока нагрузки. Следовательно, можно получить более низкую уставку и чувствительную защиту. Для успешной работы защиты требуется минимальное значение тока обратной последовательности, равное 8 % от тока прямой последовательности.

Сигнализация повреждённого участка

Непростой задачей для рассматриваемой схемы является поиск места повреждения (ОМП) на линиях при ОЗЗ. Выше отмечалось, что для подводных кабелей ЛЭП2 это – большая проблема. Непросто также отыскать место повреждения на воздушных линиях ЛЭП 3 и ЛЭП 4 при условии, что *на кабелях ЛЭП 2 напряжение при этом не должно существенно повышаться относительно номинального*. «Верховой осмотр», т.е. поочерёдный осмотр всех изоляторов повреждённой линии при отсутствии на ней напряжения, едва ли можно считать удовлетворительным способом решения задачи из-за его большой трудоёмкости. Если же подать напряжение на ЛЭП 3 или ЛЭП 4 через любой из кабелей, то напряжение на двух неповреждённых фазах кабеля существенно увеличится и опасность повреждения кабелей возрастёт.

В связи с этим был предложен следующий *порядок ОМП на воздушных ЛЭП*.

При любом ОЗЗ в сети она отключается защитой, установленной на подстанции Еланцы, с выдержкой времени 1 с. Для выявления повреждённого участка на развилке кабелей со стороны материка установлены два комплекта сигнализации, реагирующей на токи нулевой последовательности. По срабатыванию этих комплектов выявляется «повреждённый участок», т.е. кабель и следующая за ним воздушная линия ЛЭП 3 или ЛЭП 4. Если комплекты сигнализации на развилке кабелей не сработали, повреждённой считается ЛЭП 1.

При повреждении ЛЭП 1 отключают разъединители в цепях обоих кабелей, блокируют защиту от ОЗЗ на подстанции Еланцы, на ЛЭП 1 подают напряжение, и поиск места повреждения ведут традиционным методом – по высокочастотному излучению (например, с помощью приборов «Поиск», «Волна» или им подобных). Обрывы проводов ЛЭП выявляются визуально.

При срабатывании сигнализации на развилке кабелей отключают разъединитель повреждённого направления, включают секционный выключатель на стороне 10 кВ на подстанции Хужир и подают напряжение 35 кВ на ту ЛЭП, на которой ведётся поиск неисправности, обратной трансформацией через соответствующий трансформатор на

подстанции Хужир. Секционный разъединитель на стороне 35 кВ при этом должен быть отключён. При таком варианте выдачи напряжения на воздушную линию (ЛЭП 3 и ЛЭП 4) повышения напряжения на кабелях не будет из-за того, что повреждённая воздушная ЛЭП гальванически отделена от остальной сети 35 кВ.

Поиск неисправностей предполагается вести так же, как на ЛЭП 1.

Выбор принципа действия селективной сигнализации на развилке кабелей затрудняется тем, что секционный разъединитель на стороне 35 кВ подстанции Хужир может находиться как в отключённом (в нормальном режиме работы сети), так и во включённом состоянии (например, при ремонте понижающего трансформатора 35/10 кВ на подстанции Хужир).

При отключённом положении секционного разъединителя 35 кВ, как показал проведённый анализ, селективная сигнализация повреждённого участка может быть обеспечена посредством токовой направленной защиты нулевой последовательности, реагирующей на составляющую тока ОЗЗ промышленной частоты. Ненаправленная токовая защита не обеспечивает необходимой чувствительности.

При включённом положении секционного разъединителя 35 кВ предложено использовать принцип поперечной направленной защиты по токам нулевой последовательности.

В качестве базового для построения схемы селективной сигнализации принято устройство УЗЛ-2 совместного производства Новосибирского государственного технического университета и ООО «ПНП БОЛИД». Комплекты сигнализации находятся в шкафу с термообогревом, расположенном на берегу озера Байкал.

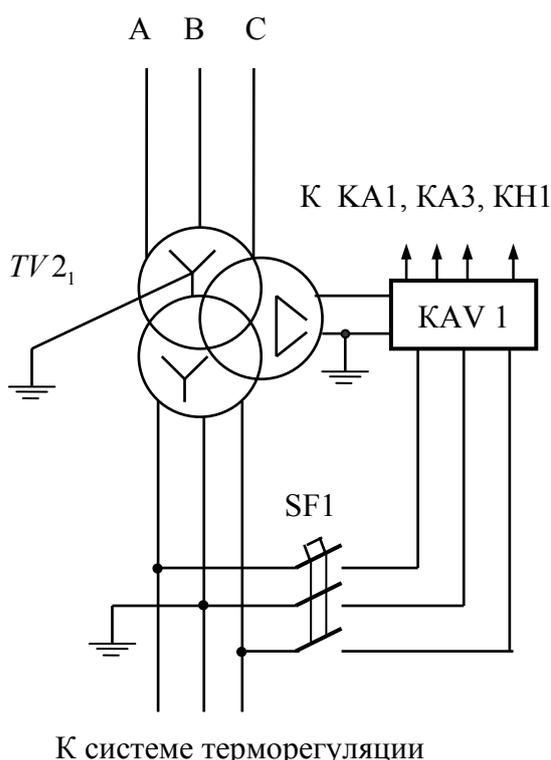


Рис.5. Схема подключения основного блока KAV1 к трансформатору напряжения

Каждый комплект сигнализации содержит:

- один основной блок KAV, предназначенный для выработки напряжений питания ± 15 В и опорного напряжения $U_{оп}$, содержащего информацию о фазе напряжения нулевой последовательности $3U_0$;

- два линейных блока (KA1, KA3), выполняющих функции направленной токовой сигнализации нулевой последовательности;

- один блок энергонезависимой сигнализации (KN1), который при помощи реле-переключателей может неограниченно долго сохранять информацию о выданных на него с блоков KAV 1, KA1, KA3 сигналах.

При необходимости блок KN1 может быть

автоматически (выданным на него электрическим сигналом) возвращён в исходное состояние.

На рис.5 показана схема подключения основного блока KAV 1 к трансформатору напряжения. В состав блока KAV 1 входит источник питания ± 15 В, от которого получают питание оперативным током блоки KA1, KA3, KN 1. Ещё в состав KAV 1 входит модуль формирования опорного напряжения $U_{оп}$, которое поступает на линейные блоки KA1, KA3. Сигнализация о повреждении цепей питания с блока KAV 1 подаётся на модуль сигнализации KN 1.

Второй основной блок KAV 2 подключается к своему трансформатору напряжения аналогично. От него сигналы поступают на блоки КА2, КА4, КН 2.

На рис.6 приведены цепи переменного тока комплекта сигнализации.

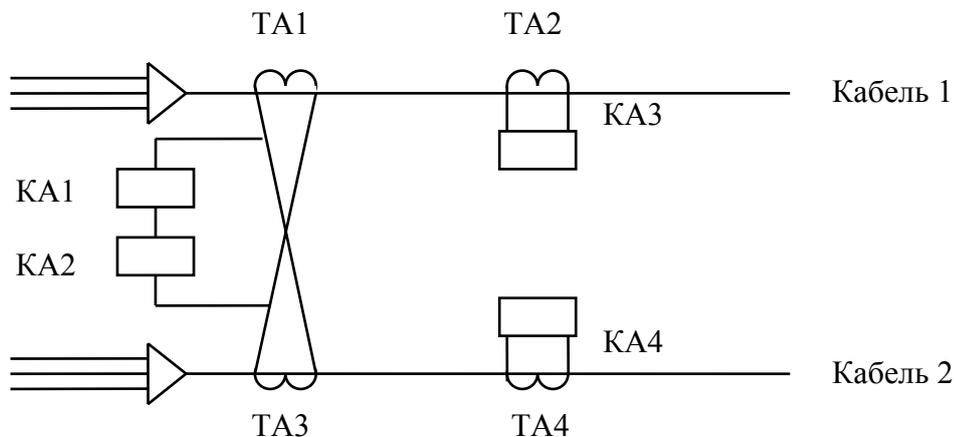


Рис.6. Цепи переменного тока комплекта сигнализации

Выбор уставок направленного токового комплекта устройства селективной сигнализации

Ток срабатывания защиты должен быть отстроен от небалансов, т.е. от сигналов, поступающих на реле устройства при отсутствии повреждения на защищаемом объекте.

Например, при ОЗЗ на ЛЭП1 устройства сигнализации, установленные на ЛЭП2 и ЛЭП3, срабатывать не должны. При ОЗЗ на одной из ЛЭП2, ЛЭП3 должен срабатывать только комплект сигнализации этой линии.

Из-за несимметрии фазных сопротивлений изоляции в кабелях и воздушных ЛЭП, которые будут выявлены в процессе эксплуатации, могут появиться и другие небалансы, величины которых на этапе проектирования трудно определить. Возникнет некоторый небаланс из-за несимметричного расположения жил кабеля в окне трансформатора тока. Его тоже можно измерить только опытным путём.

Большой небаланс в устройствах сигнализации может появиться при междуфазных коротких замыканиях (КЗ) на ЛЭП3, ЛЭП4. Для того чтобы сигнализация повреждённого направления при этом не срабатывала, время её срабатывания должно быть с запасом больше, чем время срабатывания защит от междуфазных КЗ.

Чувствительность устройства сигнализации, расположенного на развилке кабелей, не должна быть ниже, чем чувствительность защиты от ОЗЗ, установленной на подстанции Еланцы. С другой стороны нет смысла делать чувствительность сигнализации на развилке намного выше, чем у этой защиты.

Минимальная уставка основного комплекта защиты от ОЗЗ, установленного на подстанции Еланцы, как было показано выше, не должна быть ниже 12-14% фазного напряжения. С учётом изложенного уставка направленной токовой защиты нулевой последовательности была выбрана с запасом ниже – на уровне 9% от максимального тока, протекающего по ней при металлическом ОЗЗ на защищаемых элементах (кабель и следующая за ним воздушная ЛЭП).

Проведённые натурные испытания подтвердили адекватность выбранных типов защит требованиям защищаемого объекта. Выбранные уставки также не потребовали изменений.

Литература

1. Бухтояров В.Ф., Маврицын А.М. Защита от замыканий на землю электроустановок карьеров. – М.: Недра, 1986. – 184 с.
2. Шабад М.А. Расчёты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 350 с.
3. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. – М.: Высшая школа, 1991. – 496 с.
4. Шалин А.И. Замыкания на землю в линиях электропередачи 6-35 кВ. Особенности возникновения и приборы защиты // Новости Электротехники №1 (31), 2005. – С. 73–75.