

ЗАЩИТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ ДЛЯ ПУЧКОВ КАБЕЛЕЙ

Шалин А.И., Хабаров А.М.

*(ООО «ПНП БОЛИД», Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск)*

Введение

На практике нередко встречаются случаи, когда питание потребителям выдаётся через несколько параллельно включенных кабелей (через так называемый «пучок кабелей»). В таких случаях на каждом из кабелей устанавливается свой трансформатор тока нулевой последовательности (ТТНП), вторичные обмотки которых, например, в соответствии с [1], включаются либо параллельно, либо последовательно, после чего подключается токовое реле.

В соответствии с [2] в защите от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), установленной на пучке кабелей, может появиться ток небаланса, обусловленный неидеальностью характеристик ТТНП при перераспределении токов нагрузки в фазах по кабелям, входящих в пучок. Величина этого небаланса зависит от ряда факторов – степени перераспределения тока в отдельных кабелях пучка, схемы соединения вторичных обмоток ТТНП, различия их характеристик намагничивания и так далее. В [2] отмечается, что такое перераспределение токов может быть вызвано неравенством сопротивлений жил кабелей.

Некоторое время назад нами была обнаружена ещё одна причина перераспределения токов в кабелях, связанная с нарушением контактных соединений фаз кабелей при их подсоединении в ячейке. При этом возникает намного большее перераспределение токов нагрузки по кабелям, что в свою очередь приводит к появлению соответствующего тока небаланса в защите от замыканий на землю.

1. Появление токов нулевой последовательности при нарушении контактных соединений фаз кабелей в месте их подключения

Рассмотрим случай нарушения контактного соединения и появления токов нулевой последовательности в кабелях пучка на следующем примере. На рис.1 представлена схема подключения потребителя М, получающего питание от секции сборных шин через пучок из двух кабелей и силовой выключатель. В нормальном режиме работы токи в фазах потребителя равны по величине и сдвинуты по фазе друг относительно друга на 120 электрических градусов. Суммарный ток нагрузки, значение которого зависит от режима работы потребителя, равномерно распределяется по кабелям пучка. При этом значения первичных токов, протекающих по каждому кабелю, в два раза меньше суммарного тока потребителя. В результате этого суммарный магнитный поток в каждом из кабельных ТТНП равен нулю и токи в их вторичных цепях отсутствуют. Реагирующий орган защиты от ОЗЗ находится в несработавшем состоянии.

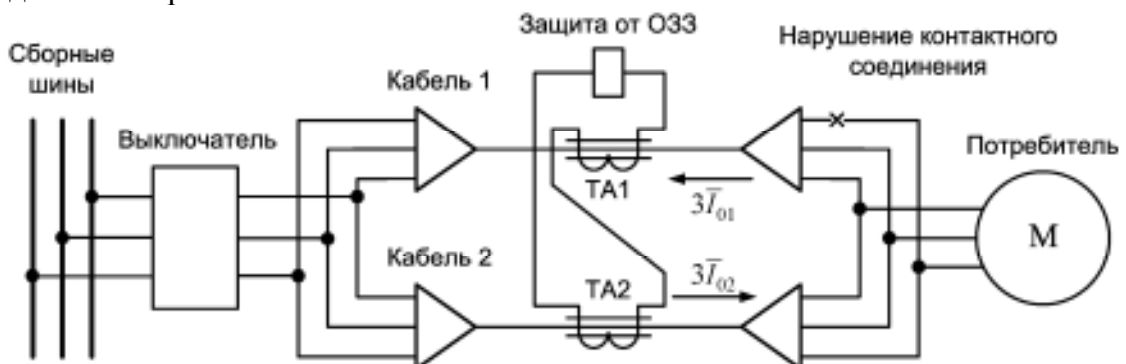


Рис.1. Появление токов нулевой последовательности при нарушении контактного соединения в пучке кабелей

При нарушении одного из контактных соединений в кабельном пучке (например, в

фазе А верхнего кабеля на рис.1) ток в соответствующей фазе кабеля уменьшается. Но поскольку суммарный ток в фазе А потребителя определяется в основном сопротивлением потребителя, а не кабеля (сопротивление кабеля чрезвычайно мало по сравнению с сопротивлением потребителя), суммарный ток в фазе А потребителя практически остаётся прежним. Следовательно, возрастает на соответствующую величину ток в фазе А оставшегося исправным кабеля.

Предполагается, что ток в фазе А верхнего кабеля продолжает протекать, но его величина уменьшилась по сравнению с токами в фазах В и С. Из рис.2,а видно, что сумма токов в фазах верхнего кабеля уже не равна нулю, а равна $3\bar{I}_{01}$. Это эквивалентно появлению в этом кабеле тока нулевой последовательности, причем этот ток может достигать весьма большой величины, соизмеримой с фазным током нагрузки. В результате во вторичной обмотке ТТНП верхнего кабеля возникают соответствующие электродвижущая сила и ток.

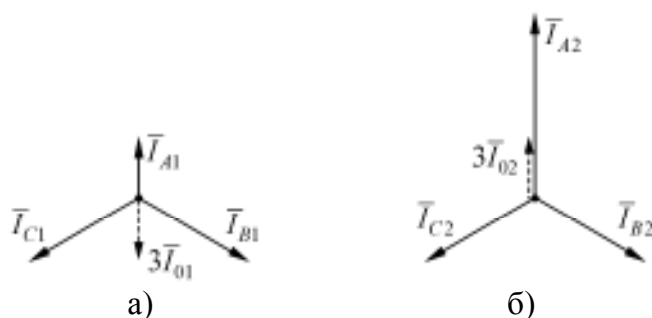


Рис.2. Векторные диаграммы токов в пучке кабелей:
а – для верхнего кабеля 1; б – для нижнего кабеля 2

Ток в фазе А нижнего кабеля увеличился и стал больше токов в фазах В и С (рис.2,б). В результате суммарный магнитный поток в кабельном трансформаторе тока нижнего кабеля также стал отличным от нуля. Во вторичной обмотке этого ТТНП появилась электродвижущая сила и ток, направленный противоположно току в обмотке ТТНП верхнего кабеля. Далее сигналы от вторичных обмоток ТТНП суммируются с учётом знаков и суммарный ток протекает че-

рез защиту от ОЗЗ. Если бы трансформаторы тока нулевой последовательности ТА1 и ТА2 были идеальными, то их вторичные сигналы в сумме дали бы ноль, и ток в защите от ОЗЗ отсутствовал бы, так как первичные токи нулевой последовательности, появившиеся в кабелях, равны друг другу по модулю и противоположны по направлению. В действительности при одинаковых первичных токах ТТНП в их вторичных обмотках появляются разные по величине электродвижущие силы и токи, что приводит к появлению в защите от ОЗЗ тока небаланса. Величина этого тока небаланса будет зависеть от степени различия характеристик намагничивания ТТНП, от величин первичных токов и т.д.

Ниже рассмотрены результаты лабораторных экспериментов, проведённых на кафедре электрических станций в Новосибирском государственном техническом университете с кабельными ТТНП типа ТЗЛМ и ТЗРЛ, которые показали, что действительно при одних и тех же первичных токах величины электродвижущих сил и токов, возникающих во вторичных обмотках, могут значительно отличаться для разных ТТНП одного типа.

2. Характеристики срабатывания защиты при различных схемах соединения вторичных обмоток ТТНП

С целью исследования сигналов в защите от ОЗЗ при нарушении контактных соединений были проведены лабораторные эксперименты с ТТНП при различных схемах соединений их вторичных обмоток и с использованием в качестве защиты реле типа РТЗ-51. По результатам проведённых экспериментов были построены зависимости, некоторые из которых представлены на рис.3.

При проведении экспериментов сначала через ТТНП пропускали противоположно направленные токи одинаковой величины (I_{TA1} и I_{TA2}). Затем один из токов, например, I_{TA2} увеличивали до тех пор, пока в реле не появится ток, превышающий выставленную

на нём уставку, после чего реле срабатывает. Аналогично добивались срабатывания реле при уменьшении тока I_{TA2} . Значения токов, при которых происходило срабатывание, фиксировались и наносились на график. Затем значения токов в каждом из ТТНП увеличивали и опыт повторяли. Таким образом, для разных уставок реле РТЗ-51 (20, 80 и 146 мА) были построены кривые, ограничивающие область несрабатывания реле.

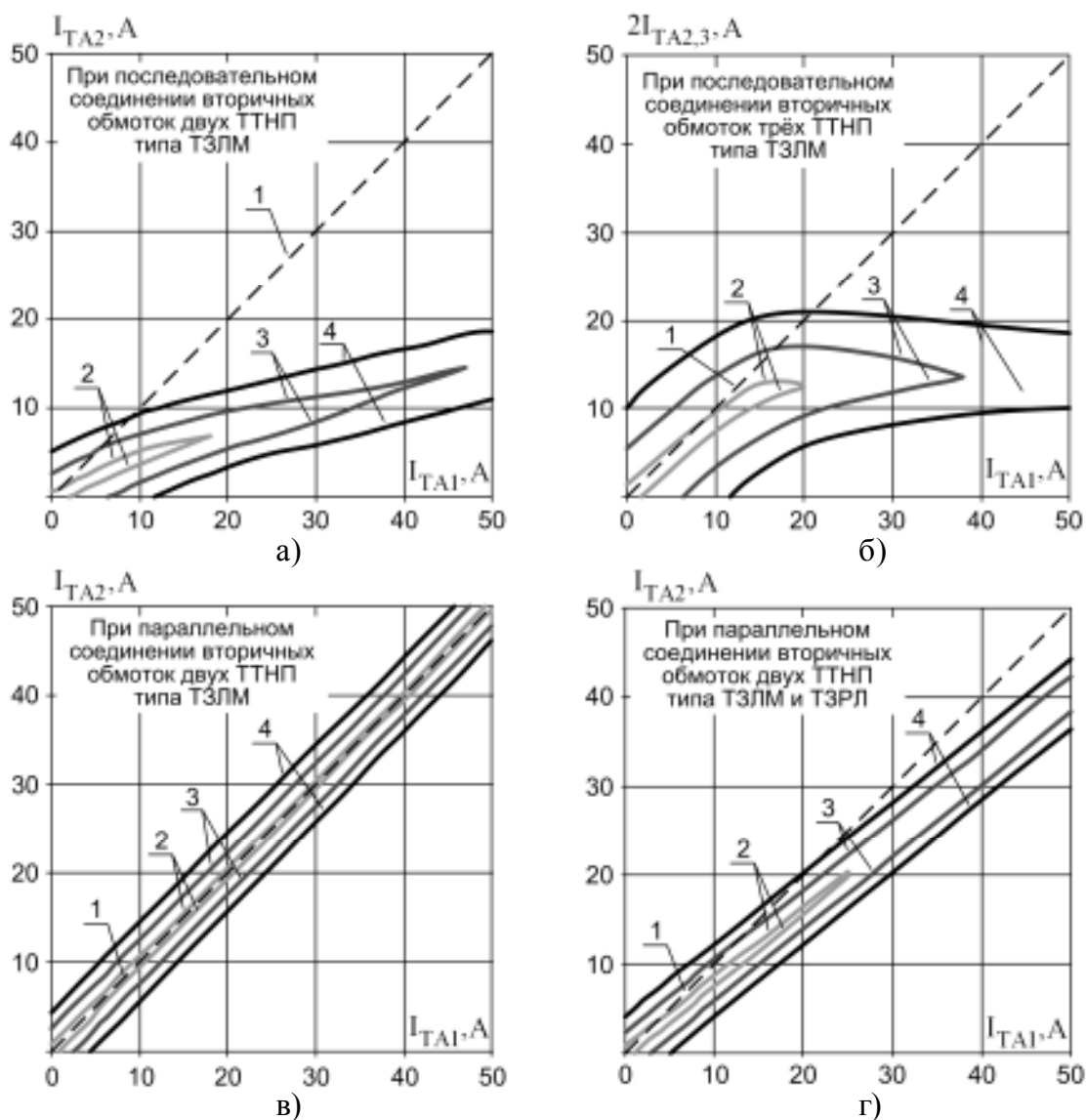


Рис.3. Характеристики срабатывания защиты при нарушении контактных соединений фаз кабелей в пучке:

1 - биссектриса угла, отвечающая равенству токов через ТТНП; 2, 3, 4 - границы области несрабатывания при уставках реле, равных соответственно 20, 80, 146 мА.

Из зависимостей, полученных для случая последовательного соединения вторичных обмоток трансформаторов тока нулевой последовательности (рис.3,а,б), видно, что в рассматриваемом случае сильно проявилась нелинейность их характеристик. Видимо, это связано с большим увеличением нагрузки на каждый из трансформаторов тока, так как при последовательном соединении их вторичных обмоток сопротивление нагрузки на каждый из них складывается из суммы сопротивления реле и сопротивления вторичной обмотки второго ТТНП.

Если бы кабельные ТТНП были идеальными, то ток небаланса в защите отсутствовал бы. При этом срабатывание реле происходило бы при увеличении или уменьшении, например, тока I_{TA2} на величину, соответствующую уставке реле. В этом случае, напри-

мер, вместо кривых 2, 3 и 4 получились бы прямые линии, расположенные по разные стороны и на одинаковом расстоянии от прямой 1.

В действительности неидентичность и нелинейность характеристик кабельных ТТНП в рассматриваемом случае приводят к появлению в защите от ОЗЗ тока небаланса. На рис.3,а кривые 2, 3 и 4 представляют собой границы области несрабатывания реле соответственно при уставках 20, 80 и 146 мА. Как видно из этого рисунка, при увеличении первичных (противоположно направленных) токов в ТТНП выше примерно двух ампер при минимальной уставке реле 20 мА происходит его ложное срабатывание. При уставке реле 80 мА ложное срабатывание происходит при увеличении первичных токов выше примерно шести ампер, а при максимальной уставке 146 мА - при увеличении первичных токов выше примерно десяти ампер.

Сужение областей несрабатывания защиты, ограниченных линиями 2, 3 и 4 (рис.3,а), при увеличении пропускаемых через ТТНП первичных токов связано с появлением у этих ТТНП разных погрешностей по фазе. Например, при пропускании тока через ТТНП ТА2 величиной в 10 ампер в защите возникает ток, для компенсации которого необходимо через ТТНП ТА1 пропустить ток в противоположном направлении в три раза больший по величине (рис.3,а). При этом попадаем в середину зоны несрабатывания защиты. Если бы ТТНП не имели погрешностей по фазе (либо эти погрешности были одинаковыми), то их вторичные токи были бы расположены под углом 180 градусов относительно друг друга. Тогда для срабатывания реле необходимо было бы увеличить ток в одном из ТТНП на одну и ту же величину. Однако из рис.3,а видно, что с ростом величин первичных токов через ТТНП требуются всё меньшие значения токов для срабатывания защиты. При дальнейшем увеличении токов через трансформаторы тока ТА1 и ТА2 зоны несрабатывания защиты сужаются и, например, при уставке реле 80 мА и при протекании через ТА1 тока величиной 50 ампер (рис.5.3,а) уже не удаётся подобрать такой величины противоположно направленного тока в ТА2, при которой реле не срабатывает, так как даже при одинаковых величинах вторичных токов этих ТТНП угол между ними отличен от 180 градусов, что приводит к протеканию в реле тока, превышающего его уставку.

В тех случаях, когда пучок состоит из трёх кабелей, используется три ТТНП, вторичные обмотки которых соединяются последовательно, параллельно или по смешанной схеме [1, 3]. Соответствующие характеристики срабатывания защиты при последовательном соединении вторичных обмоток ТТНП типа ТЗЛМ приведены на рис.3,б.

При проведении эксперимента с тремя ТТНП через один из них пропускали ток в одном направлении, а через два других пропускали в два раза меньшие по величине токи в противоположном направлении, имитируя тем самым возникновение нарушения контактного соединения в одной из фаз первого кабеля. Для большей наглядности полученных зависимостей и удобства их сравнения с зависимостями, приведёнными выше для других случаев, по вертикальной оси отложено значение удвоенного тока, протекающего через второй и третий трансформаторы тока нулевой последовательности.

Как и в вышерассмотренном случае при использовании последовательного соединения вторичных обмоток кабельных ТТНП в ненаправленной токовой защите от ОЗЗ, выполненной на реле РТЗ-51, появляется ток небаланса большой величины, вызывающий её ложное срабатывание. Применяв направленную защиту от ОЗЗ ложного срабатывания можно избежать, так как в нормальном режиме отсутствует напряжение нулевой последовательности. Однако эта защита может срабатывать излишне при внешних ОЗЗ, если ток нулевой последовательности, обусловленный в защите нарушением контактного соединения, соизмерим с собственным ёмкостным током этого присоединения или больше его. Угол тока в защите будет зависеть от фазы, в которой произошло нарушение контактного соединения, от характеристик намагничивания ТТНП, а также от их погрешностей по углу.

Ещё одним существенным недостатком использования последовательного соединения вторичных обмоток ТТНП является возможность отказа защиты при замыкании на

землю на защищаемом присоединении. Поясним это на примере рис.3,б. Допустим, в нормальном режиме суммарный ток нагрузки пучка из трёх кабелей составляет 150 ампер (по 50 А на каждый кабель), и они питают, например, секцию распределительной подстанции. Предположим, произошло нарушение контактного соединения фазы в одном из кабелей пучка, например в кабеле, на котором установлен трансформатор тока ТА1 и ток в соответствующей фазе этого кабеля уменьшился на 15 А. Токи нагрузки этой же фазы в других кабелях соответственно возрастут примерно на 7,5 А. В этом случае попадаем в точку с координатами (15;15) на рис.3,б. Если теперь в начале кабеля, на котором установлен ТТНП ТА1, произойдёт ОЗЗ, и при этом направление тока ОЗЗ совпадёт с направлением тока нулевой последовательности в ТА1, вызванного нарушением контактного соединения, то даже при величине внешнего ёмкостного тока в 35 ампер защита не сработает, так как ток в ней не превысит тока срабатывания и останется в зоне несрабатывания (в точке с координатами (50;15) на рис.3,б).

Специалисты одной из энергосистем, которые обратились к нам с описанием такого случая, отмечали, что при последовательном соединении вторичных обмоток ТТНПу них неоднократно отмечались отказы защит от ОЗЗ. Позже выяснилось, что эти отказы были связаны с нарушением контактных соединений фаз кабелей при их подсоединении в ячейке. Сами факты нарушения контактных соединений были обнаружены с помощью тепловизора.

Существенного улучшения характеристик защиты можно добиться, изменив схему соединения вторичных обмоток ТТНП с последовательной на параллельную. Характеристики срабатывания защиты при использовании двух ТТНП типа ТЗЛМ с параллельным соединением вторичных обмоток приведены на рис.3,в. Зона несрабатывания защиты существенно уменьшилась и располагается вблизи биссектрисы 1, то есть заблокировать защиту теперь можно только противоположным по фазе током в ТА1, значение которого близко к току в ТА2.

Однако необходимо учесть, что приведённые характеристики срабатывания защиты были получены при экспериментах с ограниченным числом ТТНП. Трансформаторы тока нулевой последовательности того же типа, находящиеся в эксплуатации в энергосистемах, могут иметь более отличающиеся характеристики намагничивания, чем у тех, с которыми были проведены эксперименты. Не исключено, что характеристики срабатывания защиты будут выглядеть при этом значительно хуже, чем те, которые приведены на рис.3,в.

Кроме того, на практике часто наряду с неразъёмными ТТНП типа ТЗЛМ и другими используются разъёмные трансформаторы тока нулевой последовательности, например, типа ТЗРЛ. Необходимость в их применении возникает тогда, когда кабель уже подключен в ячейке и выполнена его разделка. Характеристики срабатывания защиты при совместном использовании двух ТТНП типа ТЗЛМ (ТА2) и ТЗРЛ (ТА1), вторичные обмотки которых соединены параллельно, приведены на рис.3,г. Из этого рисунка видно, что величина тока небаланса в защите от ОЗЗ при совместном использовании разъёмного и неразъёмного трансформаторов тока больше, чем при применении неразъёмных ТТНП.

Таким образом, совместное использование разъёмного и неразъёмного трансформаторов тока нулевой последовательности крайне не желательно даже при параллельном соединении их вторичных обмоток.

3. Влияние токов небаланса, возникающих при нарушении контактных соединений фаз кабелей, на чувствительность защиты от замыканий на землю

Для оценки влияния тока небаланса на величину тока срабатывания защиты при замыкании на защищаемом присоединении были проведены лабораторные эксперименты с двумя ТТНП типа ТЗЛМ и ТЗРЛ при параллельном соединении их вторичных обмоток. В качестве защиты от ОЗЗ использовалось реле типа РТЗ-51 с выставленной на нём мак-

симальной уставкой в 146 мА. Нарушение контактного соединения в фазе одного из кабелей имитировалось пропусканием через кабельные ТТНП одного и того же тока \bar{I}_0 , но в противоположных направлениях. Предполагая, что замыкание произошло у потребителя, через кабельные ТТНП пропускали одинаково направленные токи, равные половине полного тока ОЗЗ. Фаза тока ОЗЗ j по отношению к фазе тока в одном из трансформаторов тока (ТЗЛМ) в процессе эксперимента изменялась. Поскольку трансформатор тока типа ТЗЛМ имеет «более высокую» характеристику намагничивания по сравнению с ТТНП типа ТЗРЛ (то есть при одних и тех же величинах первичных токов вторичный ток от ТТНП типа ТЗЛМ имеет большую величину), то направление тока небаланса в реле будет практически совпадать с направлением тока в ТТНП типа ТЗЛМ. Поэтому угол j по существу представляет собой угол между током ОЗЗ и током небаланса в защите.

На рис.4 показано, что при отсутствии нарушения контактных соединений ток срабатывания защиты I_{C3} при ОЗЗ имеет одинаковое значение при любом угле j (окружность 1 с центром «0» в начале координат). При нарушении контактного соединения в защите появля-

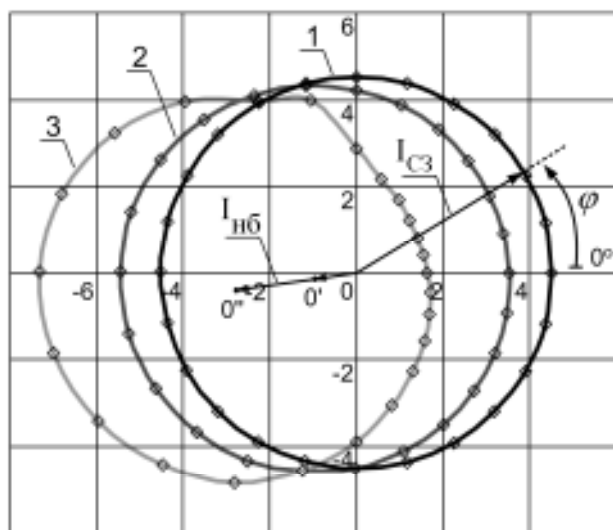


Рис.4. Влияние тока небаланса в защите на её чувствительность при ОЗЗ на защищаемом объекте: 1 – при $I_0 = 0$; 2 – при $I_0 = 5$ А; 3 – при $I_0 = 15$ А.

ется ток небаланса, который представляет собой вектор, смещающий центр окружности от начала координат ($0'$ и $0''$ - рис.4). В результате при разной степени нарушения контактного соединения (то есть при различных величинах встречных токов \bar{I}_0 в ТТНП) появляются разные по величине токи небаланса, которые влияют на величину тока срабатывания защиты при ОЗЗ.

Предположим теперь, что в нормальном режиме при отсутствии замыканий на землю в сети, в ненаправленной защите от ОЗЗ присутствует ток небаланса, величины которого недостаточно для её ложного срабатывания. Однако если теперь на этом присоединении произойдёт замыкание и ток ОЗЗ окажется направленным противоположно току небаланса в защите (угол $j = 180$ градусов на рис.4), то суммарного тока в защите может не хватить для её срабатывания,

то есть появление небаланса приведёт к загрузлению защиты и снижению её чувствительности. И, наоборот, при внешнем ОЗЗ при совпадении по фазе тока небаланса и собственного ёмкостного тока защищаемого присоединения может произойти излишнее срабатывание защиты. Отстроиться от этого тока небаланса по току срабатывания не представляется возможным, так как его величина в некоторых случаях может быть весьма существенной.

Кроме влияния на поведение защиты, перераспределение тока в отдельных кабелях пучка может привести ещё к перегрузке тех жил кабелей, в которых ток увеличился выше допустимых расчётных значений. Повысится температура кабеля и ускорится процесс старения изоляции, в результате чего кабель может выйти из строя раньше расчётного срока. Поэтому при установке защит от ОЗЗ на кабельных пучках необходимо предусматривать устройство сигнализации о нарушении нормального распределения тока в кабелях. Тогда обслуживающий персонал, получив сигнал о нарушении контактов, сможет при первой же возможности вывести в ремонт защищаемое присоединение и привести кон-

тактные соединения в порядок, прежде чем ток небаланса увеличится настолько, что приведёт к ложному срабатыванию защиты в нормальном режиме работы сети.

4. Разработка устройства защиты от ОЗЗ, способного контролировать исправность контактных соединений фаз кабелей в месте их подключения

Оптимальным может быть совмещение в одном устройстве - защиты от замыканий на землю и устройства, контролирующего исправность контактных соединений. Нами было разработано такое устройство, представляющее собой ненаправленную токовую защиту от замыканий на землю, способную также выявлять нарушения контактных соединений фаз кабелей в пучке и предупреждать об этом обслуживающий персонал.

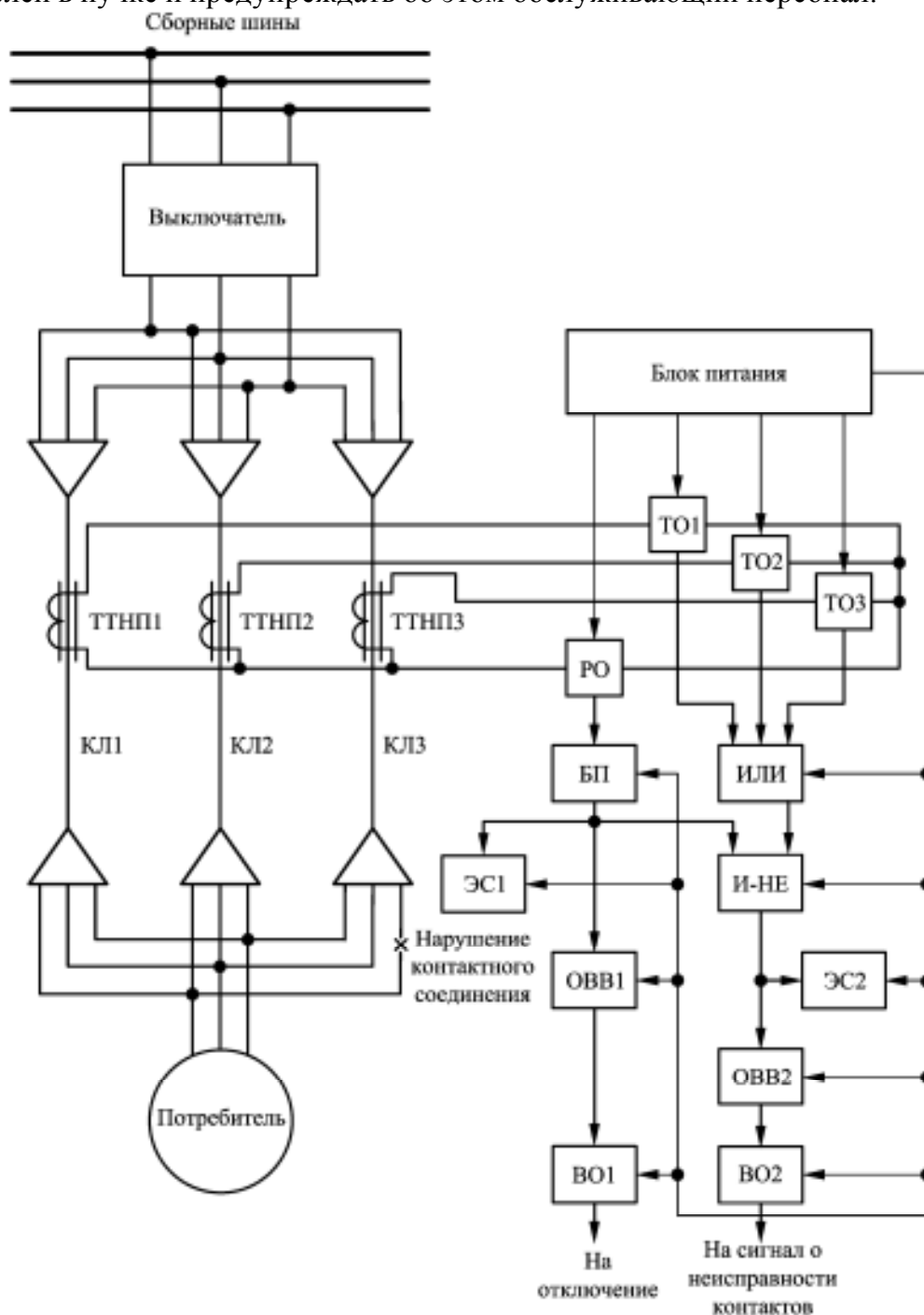


Рис.5. Структурная схема устройства защиты

На рис.5. приведена структурная схема разработанного устройства. Здесь приняты следующие обозначения: ТТНП1, ТТНП2, ТТНП3 – трансформаторы тока нулевой последовательности, установленные на соответствующих кабелях КЛ1, КЛ2, КЛ3; ТО1, ТО2,

ТОЗ – токовые органы; РО – реагирующий орган; БП – блок памяти; ИЛИ – логический элемент ИЛИ; И-НЕ – логический элемент И-НЕ; ОВВ1, ОВВ2 – органы выдержки времени; ЭС1, ЭС2 – элементы сигнализации; ВО1, ВО2 – выходные органы.

Областью применения защиты являются сети напряжением 3-10 кВ с резистивным заземлением нейтрали. Однако она может быть применена и в сети с изолированной нейтралью, если количество постоянно находящихся в работе присоединений обеспечит необходимую чувствительность защиты. На разработанное устройство защиты оформлена и отправлена заявка на изобретение.

Рассмотрим работу защиты по её структурной схеме (рис.5).

Потребитель через пучок из трёх кабелей КЛ1, КЛ2, КЛ3 и силовой выключатель получает питание от секции сборных шин. В нормальном режиме работы токи в фазах потребителя равны по величине и сдвинуты по фазе друг относительно друга на 120 электрических градусов. Суммарный ток нагрузки, значение которого зависит от режима работы потребителя, при исправных контактных соединениях примерно равномерно распределяется по всем кабелям пучка. В результате этого суммарный магнитный поток в каждом из кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности ТТНП1, ТТНП2, ТТНП3 примерно равен нулю и токи в их вторичных цепях отсутствуют. Таким образом, токи, протекающие в нормальном режиме через реагирующий орган РО и токовые органы ТО1, ТО2, ТО3, очень малы.

Реагирующий орган защиты реализует следующее выражение:

$$U_{PO} = F\{I_{PO} \geq I_{нор.РО}\}, \quad (1)$$

где U_{PO} - сигнал на выходе реагирующего органа; I_{PO} - величина тока, протекающего через реагирующий орган; $I_{нор.РО}$ - порог формирования сигнала РО.

Каждый из токовых органов реализует выражение следующего вида:

$$U_{ТО} = F\{I_{ТО} \geq I_{нор.ТО}\}, \quad (2)$$

где $U_{ТО}$ - сигнал на выходе соответствующего токового органа; $I_{ТО}$ - величина тока, протекающего через соответствующий токовый орган; $I_{нор.ТО}$ - порог формирования сигнала ТО.

Функция $F\{\dots\}$ в выражениях (1), (2) равна единице, если соблюдается условие в скобках и равна нулю в противоположном случае.

Поскольку рассматриваемое устройство для защиты от замыканий на землю является ненаправленным, то ток срабатывания реагирующего органа отстраивается от собственного ёмкостного тока защищаемого присоединения и от токов небаланса. Токи срабатывания токовых органов ТО1, ТО2, ТО3 также отстраиваются от протекающих по ним токов в режиме внешнего ОЗЗ.

В результате в нормальном режиме и в режиме внешнего замыкания на землю сигналы на выходах реагирующего органа РО и токовых органов ТО1, ТО2, ТО3 отсутствуют.

При отсутствии сигнала U_{PO} на входе блока памяти БП, на его выходе формируется единичный сигнал, который подаётся на входы первого органа выдержки времени ОВВ1, первого элемента сигнализации ЭС1, а также на первый вход логического элемента И-НЕ, на второй вход которого поступает сигнал с выхода логического элемента ИЛИ.

При появлении на входе блока памяти БП сигнала U_{PO} (при возникновении ОЗЗ на защищаемом присоединении) сигнал на его выходе становится равным нулю. Начинается отсчёт выдержки времени органом ОВВ1. Если в последующем сигнал U_{PO} исчезнет (например, при погасании дуги в месте ОЗЗ), то единичный сигнал на выходе блока памяти $U_{БП}$ появится не сразу, а лишь через некоторое время (примерно 250-300 мс). В течение этого времени орган выдержки времени ОВВ1 не будет возвращаться в исходное состоя-

ние и, если произойдет повторное зажигание дуги, то отсчет времени срабатывания продолжится.

Такое выполнение блока памяти позволяет исключить недостаток, которым обладают, как правило, многие отечественные устройства ненаправленной токовой защиты, заключающийся в том, что эти устройства могут отказывать при замыкании на линии, если оно происходит через перемежающуюся дугу. Это объясняется тем, что в процессе горения перемежающейся дуги ток то появляется, то пропадает, например, на несколько периодов промышленной частоты. При появлении тока реагирующий орган срабатывает и запускает орган выдержки времени, но из-за малой продолжительности протекания тока орган выдержки времени не успевает сработать. После погасания дуги и исчезновения тока реагирующий орган возвращается в не сработавшее состояние, в результате чего орган выдержки времени также возвращается в не сработавшее состояние, так и не выдав сигнала на отключение. Это повторяется несколько раз, но защита так и не успевает сработать.

Для бесперебойного функционирования защиты в рассматриваемом случае необходимо обеспечить «запоминание» на некоторое время факта запуска защиты, что и было достигнуто путём использования в схеме блока памяти, действующего в соответствии со следующим выражением:

$$U_{БП} = \overline{U_{PO}} \cap D_{t1}^{\downarrow},$$

где $\overline{U_{PO}}$ - инвертированный сигнал с выхода реагирующего органа; \cap - знак логического умножения; D_{t1}^{\downarrow} - оператор задержки сигнала на выходе БП на время $t1$ при исчезновении сигнала на входе БП.

Если в течение установленного времени запоминания ток нулевой последовательности появится вновь, защита должна сработать. В результате разработанное устройство защиты способно срабатывать при ОЗЗ на защищаемом присоединении, даже если оно сопровождается перемежающейся дугой со значительными по продолжительности бестоковыми паузами.

Формирование единичного сигнала $U_{ИЛИ}$ на выходе логического элемента ИЛИ происходит в том случае, если хотя бы на один из его входов поступит сигнал от одного из токовых органов:

$$U_{ИЛИ} = U_{TO1} \cup U_{TO2} \cup U_{TO3},$$

где U_{TO1} , U_{TO2} , U_{TO3} - сигналы на выходах соответствующих токовых органов ТО1, ТО2, ТО3; \cup - знак логического сложения.

Логический элемент И-НЕ реализует следующее выражение:

$$U_{И-НЕ} = \overline{U_{ИЛИ} \cap U_{БП}}.$$

В нормальном режиме и в режиме внешнего ОЗЗ этот сигнал равен единице, так как на выходе логического элемента ИЛИ сигнал отсутствует.

Первый орган выдержки времени ОВВ1 реализует выдержку времени защиты при ОЗЗ на защищаемом присоединении:

$$U_{ОВВ1} = \overline{U_{БП}} \cap D_{t2}^{\uparrow}, \quad (3)$$

где D_{t2}^{\uparrow} - оператор задержки сигнала на время $t2$.

Второй орган выдержки времени ОВВ2 реализует задержку по времени сигнала о нарушении контактных соединений в пучке кабелей:

$$U_{ОВВ2} = \overline{U_{И-НЕ}} \cap D_{t3}^{\uparrow}, \quad (4)$$

где D_{t3}^{\uparrow} - оператор задержки сигнала на время $t3$.

Сигналы на выходах органов ОВВ1 и ОВВ2 в соответствии с выражениями (3) и (4) появляются спустя некоторое время после исчезновения сигналов на их входах.

Выходные органы ВО1 и ВО2 после поступления на них соответствующих сигналов от ОВВ1 и ОВВ2 формируют выходные сигналы соответственно на отключение выключателя защищаемого присоединения или на сигнал о нарушении контактных соединений в пучке кабелей.

Таким образом, в соответствии с приведённым выше описанием, в нормальном режиме сети и при внешнем замыкании на землю срабатывания защиты от ОЗЗ, а также сигнализации о нарушении контактных соединений в пучке кабелей не происходит.

Следует отметить, что если своевременно не обратить внимания на сигнализацию о нарушении контактного соединения, и не принять соответствующих мер по восстановлению его исправности, то с течением времени сопротивление в месте нарушения контакта может существенно возрасти, что приведёт к появлению в кабелях токов нулевой последовательности большой величины. В результате ток небаланса в защите может вырасти настолько, что превысит порог срабатывания реагирующего органа РО и приведёт к ложному срабатыванию защиты в нормальном режиме.

Предотвратить ложное срабатывание защиты можно только восстановив исправность контактного соединения. По выданному рассматриваемым устройством сигналу обслуживающий персонал должен при первой же возможности вывести в ремонт защищаемое присоединение и привести контактные соединения в порядок.

Выводы

1. В защитах от замыканий на землю, установленных на так называемых «пучках кабелей», при нарушении контактных соединений фаз этих кабелей в месте их подключения, могут возникать существенные по величине токи небаланса, связанные с перераспределением тока нагрузки в отдельных кабелях пучка. При этом величина тока небаланса зависит от степени различия характеристик намагничивания ТТНП и схемы соединения их вторичных обмоток.

2. При использовании последовательного соединения вторичных обмоток кабельных ТТНП в защите от ОЗЗ появляется ток небаланса большой величины, который может не только вызвать её ложное срабатывание в нормальном режиме или излишнее срабатывание в режиме внешнего замыкания, но и привести к отказу при ОЗЗ на защищаемом присоединении.

3. При переходе на параллельное соединение вторичных обмоток ТТНП ток небаланса в защите существенно снижается. Однако совместное использование кабельных ТТНП с сильно отличающимися характеристиками, например, разъёмных и неразъёмных может привести к неправильным действиям защиты от ОЗЗ, в связи с чем является крайне нежелательным даже при параллельном соединении вторичных обмоток этих ТТНП.

4. В некоторых случаях появление тока небаланса в защите может не вызвать её ложного срабатывания, однако при определенной его величине и фазе приведёт к загромождению защиты. В режиме внешнего ОЗЗ при совпадении по фазе тока небаланса и собственного ёмкостного тока защищаемого присоединения может произойти излишнее срабатывание защиты.

5. Кроме влияния на поведение защиты, перераспределение тока в отдельных кабелях пучка может привести к перегрузке тех жил кабелей, в которых ток увеличился выше допустимых расчётных значений. Повысится температура кабеля и ускорится процесс старения изоляции, в результате чего кабель может выйти из строя раньше расчётного срока. Поэтому при установке защит от ОЗЗ на кабельных пучках необходимо предусматривать устройство сигнализации о нарушении нормального распределения тока в кабелях. Если такого сигнального устройства нет, возможны неселективные срабатывания защиты, поскольку при росте неравенства токов в кабелях небаланс будет возрастать.

6. Разработано устройство, представляющее собой ненаправленную токовую защиту от ОЗЗ, способную информировать обслуживающий персонал о возникновении нарушения контактных соединений в защищаемом кабельном пучке, а также реагировать на

ОЗЗ, сопровождающиеся перемежающейся дугой, даже если продолжительность бестоковых пауз достигает 250-300 миллисекунд.

Литература

1. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1976. – 560 с.
2. Сирота И.М. Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности. – Киев: Наук. думка, 1983. – 268 с.
3. Кискачи В.М. Схемы подключения защиты и сигнализации однофазных замыканий при параллельных кабелях // Электричество. – 1972. – № 1. – С. 13–17.