

Л.В. БАГИНСКИЙ, А.И. ШАЛЫН
Новосибирский Электротехнический Институт

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНАЯ ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРОВ И БЛОКОВ ГЕНЕРАТОР-ТРАНСФОРМАТОР

1. Введение

В связи со значительным ростом мощностей энергетических систем, а также с переходом на высокие напряжения и каскадные трансформаторы тока всё большее количество комплектов дифференциальных защит трансформаторов перестает удовлетворять современным требованиям. Это объясняется значительным увеличением тока небаланса и необходимостью отстройки от него. Токи же при внутреннем коротком замыкании в минимальном режиме остаются весьма низкими, в результате чего чувствительность защит имеет общую тенденцию к снижению. К тому же, изменение токов небаланса в защите объекта при изменении схемы примыкающей системы приводит к необходимости изменения уставок защиты и даже к замене отдельных элементов токовых цепей, таких как трансформаторы тока, контрольные кабели и т.д. При этом, в связи с увеличением объема обслуживания, значительно снижается надежность защиты [1]. Как показано в упомянутой работе чрезвычайно большая доля ложных срабатываний и отказов в действии защиты обусловлена ошибками обслуживающего персонала. Поэтому мы считаем, что требование сокращения вмешательства обслуживающего персонала в работу дифференциальных защит трансформаторов должно быть одним из основных, наряду с селективностью, чувствительностью и т.д.

Надежность защиты может быть значительно повышена, а объем вмешательства обслуживающего персонала уменьшен, если отпадает необходимость в изменении уставок и элементов схемы защиты при развитии системы. Последнего можно достигнуть при переходе к защитам, обладающим гарантированной селективностью, под которой здесь понимается достижение характеристик реле, гарантирующих селективность защиты в случае внешних коротких замыканий при любом реально возможном развитии примыкающей к защищаемому трансформатору системы без изменения первоначально заданных уставок и заменены элементов токовых цепей. При этом уровень тока срабатывания должен отвечать современным требованиям к чувствительности, включая витковые замыкания.

Один из наиболее эффективных способов достижения гарантированной селективности — применение дифференциально-фазных защит трансформаторов.

2. Логический синтез схемы

Как показывает соответствующий анализ, дифференциально-фазный принцип защиты хорошо согласуется с логическим методом анализа и синтеза схем. Этот математический метод позволяет решать разнообразные простые и сложные задачи, встречающиеся в процессе проектирования и исследования такого рода схем благодаря тому, что логическая часть в дифференциально-фазном реле защит элементов электростанций охватывает практически всю схему реле, и в основе работы последнего лежат логические закономерности.

Ниже приведены примеры логического синтеза двух устройств дифференциально-фазных защит, использующие методику, изложенную в [2].

А. Предположим, что необходимо защитить трехобмоточный трансформатор, изображенный на рис. 1. Положительные полупериоды токов со всех трех сторон трансформатора здесь

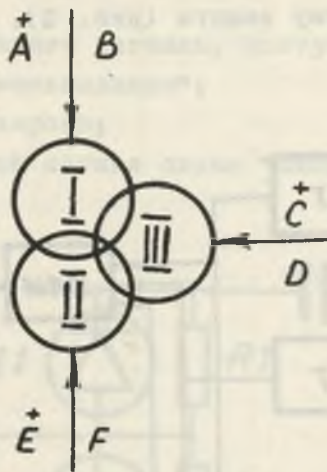


Рис. 1

обозначены буквами А, С, Е, отрицательные - буквами В, D, F. Реле должно сработать в том случае, если есть хотя бы один ток положительной полярности (А, или С, или Е) и нет ни одного тока отрицательной полярности (В или D или F) или наоборот, есть токи отрицательной полярности и нет ни одного положительного тока. При этом необходимым условием срабатывания является отсутствие блокировки защиты при броске намагничивающего тока (наличие блокировки при броске обозначено символом ш) [3].

Переходя к уравнениям алгебры логики, получаем следующую релейную функцию, которую должен реализовать реле дифференциально-фазной защиты трансформаторов:

$$T_g = \bar{M} [\bar{A} \cdot \bar{C} \cdot \bar{E} (B+D+F) + \bar{B} \cdot \bar{D} \cdot \bar{F} (A+C+E)], \quad (1)$$

где \bar{M} , \bar{A} , \bar{C} , \bar{E} и т.д. - инверсия логического сигнала.

Пользуясь приемами логического синтеза схем, релейная функция которых записана по правилам двоичной логики, получаем структурную схему защиты (рис. 2).

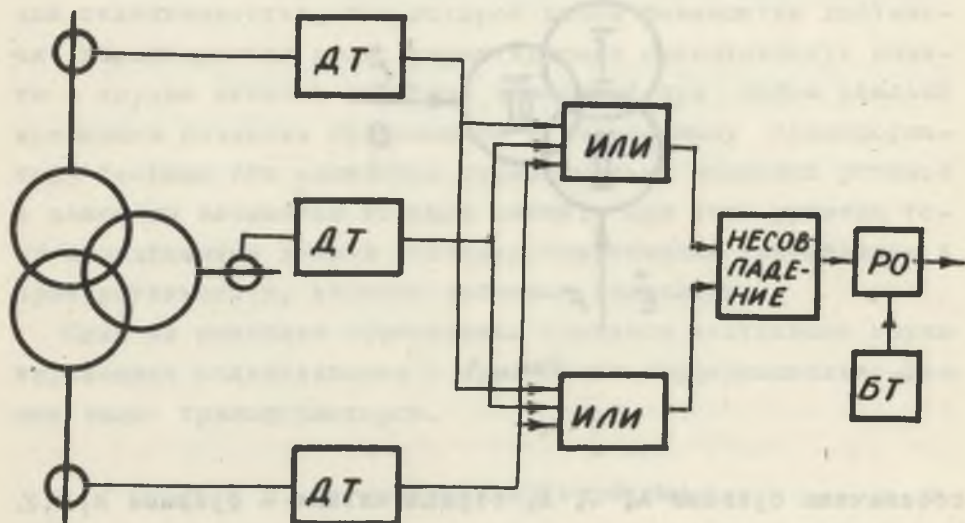


Рис. 2

Реле состоит из следующих элементов. ДТ – датчики тока количество которых равно числу плеч защиты. В качестве датчиков тока могут быть, например, применены промежуточные трансформаторы, насыщающиеся или линейные. Сигналы снимаемые со вторичных обмоток этих трансформаторов, разделяются по знаку полупериодов. Сигналы одного и того же знака стабилизируются по величине, логически складываются в блоках "ИЛИ" и поступают затем на вход блока "Несовпадение" который реализует логическую функцию

$$Z_3 = Z_1 \bar{Z}_2 + \bar{Z}_1 Z_2, \quad (2)$$

где

Z_1, Z_2 - логические сигналы, поступающие на входы блока "несовпадение";

\bar{Z}_1, \bar{Z}_2 - их инверсии;

Z_3 - входной сигнал блока "несовпадение".

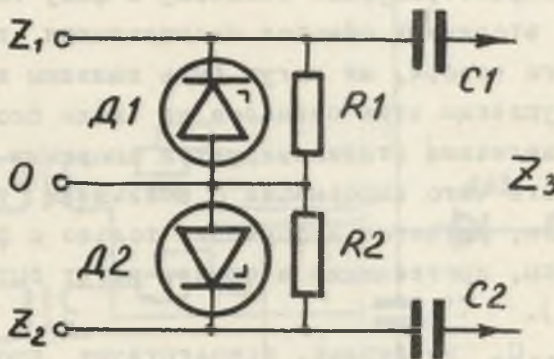


Рис. 3

Такой комбинированный блок применен с целью упрощения логической схемы, а также возможности применения в ней более надежных и стабильных элементов. При реализации приведенной выше релейной функции с помощью элементарных логических блоков количество последних было бы выше, а реализовались бы они на транзисторах и других элементах, имеющих малую стабильность, так как блоков инверсии на диодах, активных сопротивлениях и т.д. в настоящее время не разработано. Кроме того для питания схемы на транзисторах потребовался бы стабилизированный источник питания с низким напряжением, что в значительной мере уменьшило бы на-

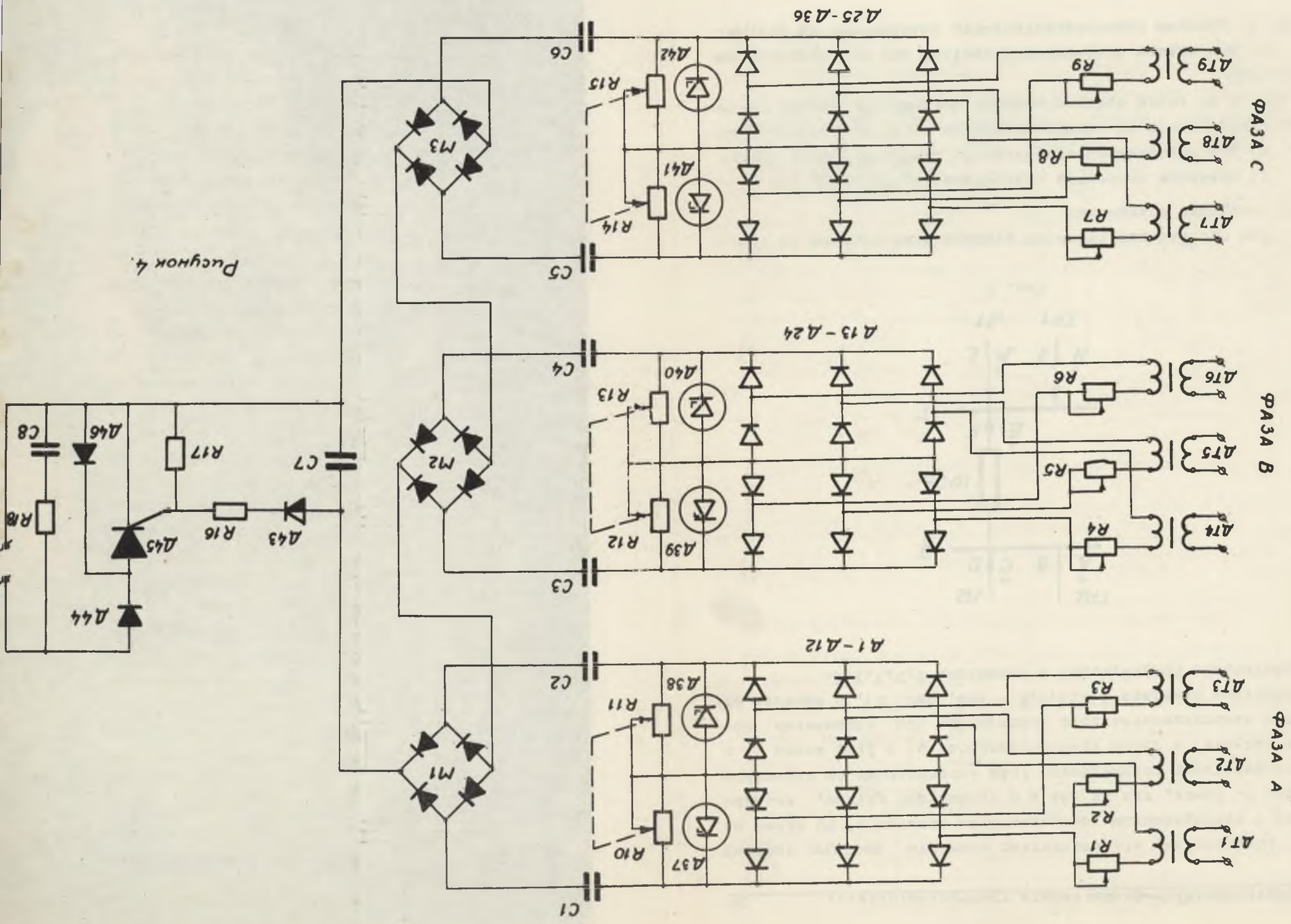
дежность схемы. Схема примененного логического блока "Несовпадение" приведена на рис. 3, где обозначено D_1, D_2 - опорные диоды; R_1, R_2 - резисторы плеч схемы сравнения; C_1, C_2 - разделительные ёмкости. Назначение опорных диодов - стабилизировать сигнал, поступающий на входы блока "Несовпадение" и, тем самым, способствовать реализации функции (2). Необходимость такой стабилизации видна из принципиальной схемы реле, изображенной на рис. 4. Действительно, сигналы, характеризующие величину и фазу тока, снимаются здесь со вторичных обмоток насыщающихся трансформаторов, и строго говоря, не могут быть названы логическими. Но после поступления этих сигналов на входы блока "Несовпадение", их величина стабилизируется опорными диодами D_1, D_2 , в результате чего информация о величинах токов плеч защиты теряется, остается информация только о фазе этих токов, а процессы, протекающие в схеме, могут быть описаны выражением (1).

Ёмкости C_1, C_2 во-первых, препятствуют протеканию по реагирующему органу постоянного тока небаланса, возникающего вследствие разброса параметров опорных диодов D_1, D_2 а, во-вторых, отделяют цепи оперативного постоянного тока от логической схемы реле.

С выхода описанного блока "Несовпадение" сигнал поступает на реагирующий орган РО, в качестве которого в схеме рис. 4 применен бесконтактный выходной орган на тиристоре. Управление тиристора импульсное - посредством включенного в цепь управляющего электрода тиристора чувствительного элемента схемы - динистора.

Блок торможения при броске намагничивающего тока БТ на схеме рис. 2) на принципиальной схеме (рис. 4) не показан.

Б. В качестве второго примера применения логического метода для синтеза схем дифференциально-фазных защит рассмотрим синтез реле дифференциально-фазной защиты шин.



Предположим, что необходимо защитить двойную систему шин с фиксированным распределением элементов по схеме на рис. 5. Здесь, так же как и в предыдущем случае, наличие положительных полупериодов тока (совпадающих со стрелками на рисунке) в цепях трансформаторов Тр1 и Тр2, линии Л1 и Л2 и шиносоединительного выключателя ШСВ обозначено посредством символов А, С, Е, Н, К (см. рис. 5), а наличие отрицательных полупериодов - символами В, D, F, I, L.

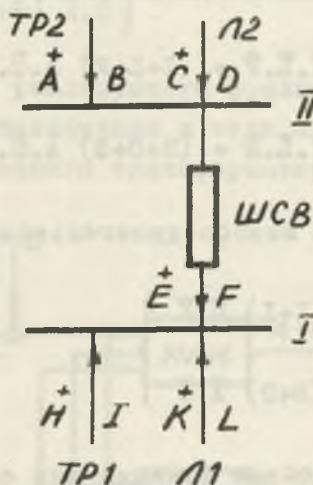


Рис. 5

При составлении релейной функции были приняты за основу следующие положения:

- а) фиксация элементов осуществляется согласно рис. 5;
- б) для обеспечения селективного действия защиты каждой из систем шин в её релейную функцию включены запрещающие сигналы от токов противоположных полярностей другой системы шин;
- в) для выбора поврежденной системы шин используется сигнал от датчика шиносоединительного выключателя (в повреж-

денную систему шин ток от шиносоединительного выключателя втекает, из неповрежденной - вытекает);

г) при отключении шиносоединительного выключателя защищаемые системы шин работают отдельно и релейная функция, которую необходимо реализовать, соответственно изменяется

Релейные функции, составленные с учетом изложенных выше замечаний и записанные с применением символов алгебры логики имеют следующий вид:

при включенном шиносоединительном выключателе

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= (H+K+E) \bar{B} \cdot \bar{D} \cdot \bar{I} \cdot \bar{L} \cdot \bar{F} + (I+L+F) \bar{A} \cdot \bar{C} \cdot \bar{H} \cdot \bar{K} \cdot \bar{E} \\ T_2 &= (A+C+F) \bar{B} \cdot \bar{D} \cdot \bar{I} \cdot \bar{L} \cdot \bar{E} + (B+D+E) \bar{A} \cdot \bar{C} \cdot \bar{H} \cdot \bar{K} \cdot \bar{F} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

при отключенном шиносоединительном выключателе

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= (H+K) \bar{I} \cdot \bar{L} + (I+L) \bar{H} \cdot \bar{K} \\ T_2 &= (A+C) \bar{B} \cdot \bar{D} + (B+D) \bar{A} \cdot \bar{C} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Здесь T_1, T_2 - релейные функции для соответствующей системы шин.

Схемная реализация непосредственно функций (3) и (4) вызывает определенные трудности. Для более простой реализации эти функции полезно было бы привести в виду (2). Тогда удалось бы использовать описанный выше блок "Несовпадение" и получить схему без транзисторов. При переходе к виду (2), однако, не должно появиться ложных членов, которые могут привести к отказу или ложному срабатыванию схемы при каком-либо реальном режиме её работы. Соответствующий анализ показал, что этим условиям удовлетворяют функции (5) и (6):

при включенном шиносоединительном выключателе

$$T'_1 = (H+K+E+A+C) \bar{I} \cdot \bar{L} \cdot \bar{F} \cdot \bar{B} \cdot \bar{D} + (I+L+F+B+D) \bar{H} \cdot \bar{K} \cdot \bar{E} \cdot \bar{A} \cdot \bar{C} \quad (5)$$

$$T'_2 = (A+C+F+H+K) \bar{B} \cdot \bar{D} \cdot \bar{E} \cdot \bar{I} \cdot \bar{L} + (B+D+E+I+L)$$

при отключенном шиносоединительном выключателе

$$T'_1 = (H+K) \bar{I} \cdot \bar{L} + (I+L) \bar{H} \cdot \bar{K} \quad \left. \vphantom{T'_1} \right\} \quad (6)$$

$$T'_2 = (A+C) \bar{B} \cdot \bar{D} + (B+D) \bar{A} \cdot \bar{C}$$

Блок-схема реле, реализующего функции (5) и (6), приведена на рис. 6. Обозначения в этой схеме приняты такие же, как и в случае защиты трансформаторов.

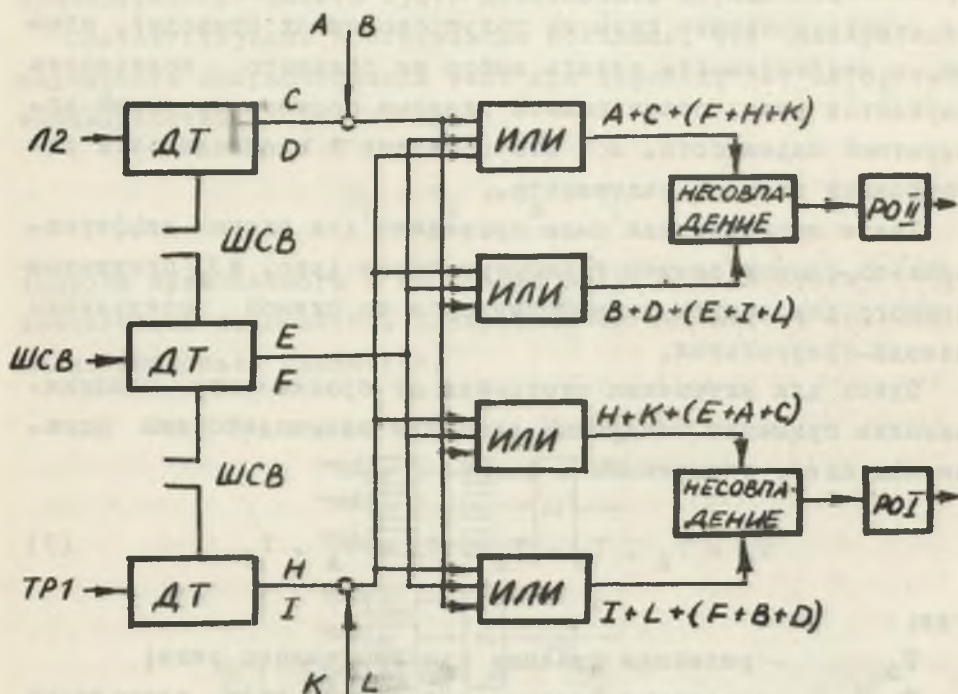


Рис. 6

По данной блок-схеме был изготовлен опытный экземпляр реле, который успешно прошел лабораторные испытания. Реле защиты шин так же, как и реле защиты трансформаторов удалось выполнить без применения транзисторов, что в значительной степени повысило стабильность его параметров и надежность.

3. Оптимизация структурной схемы односистемного реле защиты трансформатора

Переход к дифференциально-фазным реле на полупроводниках, как показано выше, дает возможность повысить надежность защиты вследствие снижения объема вмешательства обслуживающего персонала. В то же время разработка такого рода схем может привести к снижению аппаратной надежности по сравнению с применяемыми в настоящее время реле. К тому же конструирование схем на полупроводниках приводит, обычно, к необходимости делать выбор из большого количества вариантов реле, отличающихся главным образом по своей аппаратной надежности. Все это приводит к необходимости оптимизации схем по надежности.

Такие исследования были проведены для схемы дифференциально-фазной защиты трансформаторов (рис. 4), предназначенного для защиты трансформаторов со схемой соединения звезда-треугольник.

Здесь для улучшения отстройки от броска тока намагничивания применен следующий алгоритм взаимодействия логических схем, включенных в фазы:

$$T_S = T_A \cdot T_B + T_B \cdot T_C + T_A \cdot T_C \quad (7)$$

где:

- T_S - релейная функция односистемного реле;
- T_A, T_B, T_C - релейные функции логических схем, включенных в фазы А, В, С соответственно.

Это достигается следующим образом:

напряжение срабатывания реагирующего органа, включенного на сумму сигналов, снимаемых с выпрямительных мостов (М1-М3), принимается большим, чем напряжение стабилизации опорного диода (Д37-Д42), но меньшим удвоенной величины этого напряжения. При появлении сигнала на выходе одной из логических схем, реагирующий орган не срабатывает и защита не отключает защищаемый объект. На выходе реле сигнал появляется только в том случае, если появляются сигналы на выходе хотя бы двух логических схем.

Выше уже указывалось, что данное реле предназначено для защиты трансформатора со схемой соединения звезда - треугольник. При этом, как показано в [4, 5], любое повреждение в зоне действия сопровождается протеканием тока в двух фазах защиты, т.е. при любом повреждении на защищаемом трансформаторе защита будет действовать нормально.

Соответствующие исследования показали, что аппаратная надежность несрабатывания реле при переходе от алгоритма взаимодействия.

$$T_S = T_A + T_B + T_C \quad (8)$$

(широко применяемого в настоящее время) к алгоритму (7), значительно повышается. Аппаратная же надежность срабатывания несколько снижается.

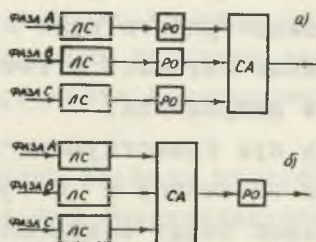


Рис. 7

На рис. 7 а), б) показаны возможные блок-схемы односистемного реле дифференциально-фазной защиты трансформаторов, имеющего алгоритм взаимодействия схем в фазах по выражению (7). На этом рисунке применены следующие обозначения: ЛС - логические схемы в фазах А, В, С, реализующие релейную функцию (1); РО - реагирующий орган; СЛ - схема реализующая алгоритм (7).

Сравнительный анализ показал, что с точки зрения аппаратной надежности схема рис. 7б выгоднее, чем рис. 7а.

Кроме описанного выше, была проведена оптимизация времени срабатывания реагирующего органа с точки зрения аппаратной надежности. С этой целью были рассмотрены два варианта:

а) реагирующий орган, срабатывающий от первого полупериода поданного напряжения;

б) реагирующий орган, срабатывающий только при наличии двух последовательно идущих полупериодов напряжения.

Случаи а) и б) могут быть легко получены при неизменной схеме реагирующего органа подбором величины емкости на его входе (см. рис. 4) или подбором величины предвключенного сопротивления и напряжения срабатывания РО. С точки зрения аппаратной надежности варианты а) и б) существенно неравноценны. Аппаратная надежность срабатывания выше в первом случае, так как даже исчезновение одного из полупериодов напряжения не приводит к отказу защиты. В то же время аппаратная надежность несрабатывания будет выше в случае б), т.к. для ложной работы реле в этом случае необходимо появление ложных сигналов в течение двух последовательных полупериодов напряжения.

Анализ показал, что при существующих в настоящее время интенсивностях отказов элементов и с учетом статистики действия дифференциальных защит более оправдано применение реагирующего органа типа б).

При подсчете численных значений показателей аппаратной надежности описанного реле дифференциально-фазной защиты трансформатора выяснилось, что определяющее влияние на надежность реле оказывают опорные диоды, входящие в блок "Несовпадение". Для сравнительно частого профилактического контроля исправного состояния этих опорных диодов и некоторых других элементов схемы было разработано специальное устройство, которое может быть либо встроено в реле, либо выполняться отдельно.

При проверке исправного состояния схемы дифференциально-фазного реле оператор должен нажать соответствующую кнопку, в результате чего производится автоматический контроль исправности схемы. После окончания контроля и появления световой сигнализации о его результатах, оператор отпускает кнопку и схема контроля полностью отключается от основной схемы реле. Таким образом до минимума сводится вмешательство обслуживающего персонала, исключается повреждение основной схемы реле в процессе эксплуатации вследствие повреждения схемы контроля, а также дополнительно в значительной степени увеличивается аппаратная надежность разработанного реле дифференциально-фазной защиты.

4. Исследование характеристик реле

А. Экспериментальное исследование характеристик реле, схема которого изображена на рис. 4, показало его работоспособность и достаточно хорошую селективность. Реле не срабатывало при внешних коротких замыканиях даже в том случае, если погрешность трансформаторов тока по модулю достигало 70÷80%.

Б. При достаточно хорошей отстройке от броска тока намагничивания даже без применения специального блока торможения и времени срабатывания при периодическом токе около 0,03 сек, ток срабатывания защиты при внутренних коротких замыканиях был меньше номинального, его можно снизить еще

больше, применив дополнительный блок торможения. Обрыв одной из токовых цепей даже при внешнем коротком замыкании не приводит к ложному действию защиты вследствие того что алгоритм взаимодействия логических схем в фазах описывается выражением (7).

В. Так как реле дифференциально-фазной защиты, описанное выше, по своему принципу действия допускает большие погрешности трансформаторов тока и включается в цепь каждого из них, то стоимость защиты может быть существенно снижена, если включить реле дифференциально-фазной защиты в цепи трансформаторов тока других защит, что исключает необходимость иметь дополнительные трансформаторы тока и контрольные кабели.

Г. Исследование чувствительности защиты к токам при внутренних коротких замыканиях показало также несколько большие возможности разработанного реле по сравнению с имеющимися в настоящее время. Предположим, что внутреннее короткое замыкание в трансформаторе сопровождается протеканием токов согласно схеме рис. 8. В этом случае соответствующим подбором параметров элементов, входящих в схему реле, оказывается, можно получить три принципиально различные характеристики зависимости тока срабатывания реле от токораспределения в плечах защиты (рис. 9). Если ток срабатывания реле при одностороннем питании (наличии толь-

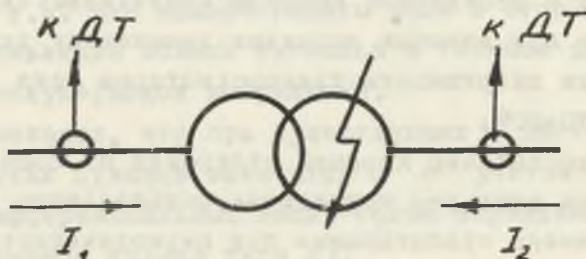


Рис. 8

ко одного из токов I_1 или I_2) принять на I , то при одинаковых по величине токах $I_1 = I_2$ можно получить ток срабатывания защиты при характеристике I типа, равным 0,6; 2 типа - 1,0; 3 типа - 2,0.

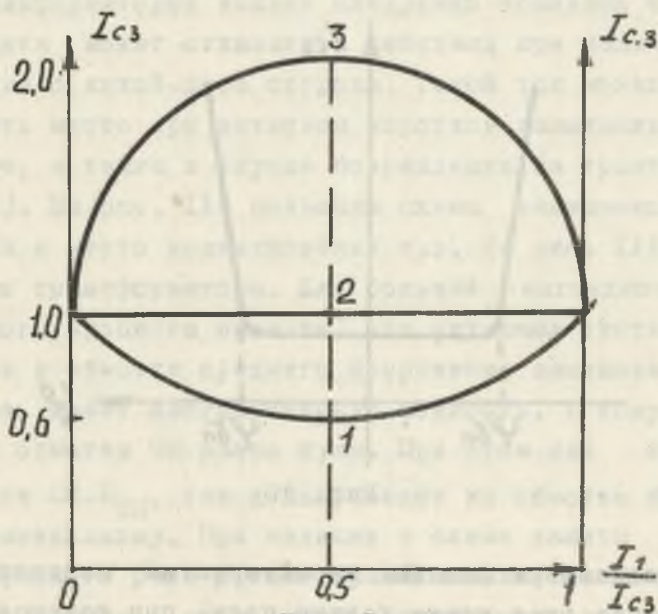


Рис. 9

В настоящее время получили распространение дифференциальные реле, имеющие характеристику 2 типа. Но очевидно что характеристика 1 типа может дать большие преимущества, например, при защите трехобмоточного трансформатора, если расчетным является режим короткого замыкания с одной из сторон при отключенном выключателе на этой стороне. В настоящее время защиты часто не имеют в этом режиме достаточно высокого коэффициента чувствительности.

При наличии же у реле характеристики I типа оно может быть достаточно надежно отстроено от броска тока намагничивания (режим одностороннего питания), а при двухстороннем питании может дать дополнительное увеличение чувствительности в 1,67 раза.

Характеристика чувствительности 3 типа, как показал соответствующий анализ, может представить определенный интерес с точки зрения аппаратной надежности.

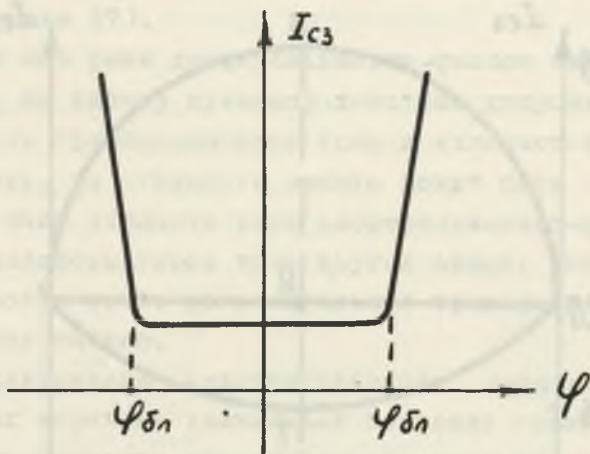


Рис. 10

Д. Исследование фазовых характеристик описанного реле показало, что угол между токами плеч, при котором ток срабатывания защиты резко изменяется (см. рис. 10) (угол блокировки $\varphi_{\delta 1}$) может быть в широких пределах отрегулирован изменением отношения между напряжением стабилизации опорных диодов в блоке "Несовпадение" и напряжением срабатывания реагирующего органа. С этой целью резисторы в схеме сравнения блока "Несовпадение" могут быть выполнены в виде двояных потенциометров и напряжение с их движков должно быть подано на реагирующий орган. Реально удавалось угол блокировки изменить от $60^\circ \div 70^\circ$ до $150 \div 170^\circ$. Уставка реле по углу блокировки должна быть выбрана в результате анализа возможных угловых погрешностей трансформаторов тока и зависит от класса точности, схемы соединения и нагрузки последних в режиме внешнего короткого замыкания.

5. Возможность блокирования дифференциально-фазного реле при внутренних коротких замыканиях

Анализ характеристик дифференциально-фазного реле защиты трансформаторов выявил следующий основной их недостаток. Защита может отказать в действии при наличии вытекающего тока с какой-либо стороны. Такой ток может, например, иметь место при витковом коротком замыкании в трансформаторе, а также в случае повреждения на трансформаторе (рис. II). На рис. IIа показана схема защищаемого трансформатора и место возникновения к.з. На рис. IIб - схема замещения трансформатора. Для большей наглядности иллюстрируемого процесса принято, что питающая система, подключенная к обмотке среднего напряжения защищаемого трансформатора, имеет неограниченную мощность. К тому же сопротивление обмотки СН равно нулю. При этом как напряжение на обмотке СН $U_{СН}$, так и напряжение на обмотке ВН $U_{ВН}$ слизики к номинальному. При наличии в схеме защиты дифференциально-фазного реле и токе срабатывания, меньшем номинального, защита в этом режиме может быть заблокирована,

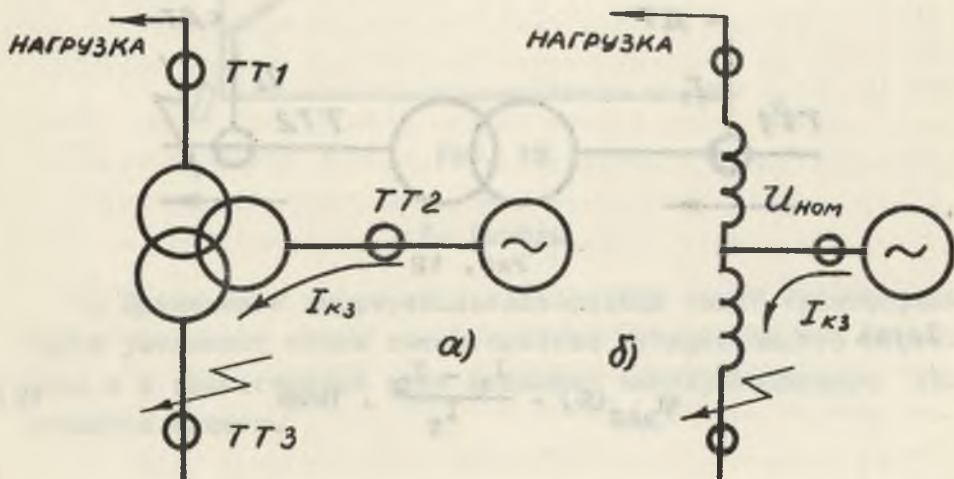


Рис. 11

хотя угол между токами в этом случае и не равен 180° , вследствие того, что ток к.з., втекающий в зону действия близок к индуктивному, а ток нагрузки к активному, т.е. угол между токами в этом режиме $90^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ и зависит от соотношения активных и реактивных сопротивлений в цепи к.з.

Чтобы предотвратить отказ защиты в этом режиме следует выбрать параметры схемы таким образом, чтобы вытекающий ток, близкий по величине к номинальному, еще не блокировал действие защиты. Это положение может быть также наглядно продемонстрировано на одной из характеристик реле дифференциально-фазной защиты трансформаторов — $\psi_{\text{доп}}$ (допускаемой погрешности). Величина "допускаемой погрешности" может быть определена следующим образом (рис. 12). Предположим, что при внешнем к.з. по схеме рис. 12 трансформатор тока ТТ2 насыщается и дает отрицательную погрешность в модуле тока, а ТТ1 трансформирует ток к.з. без искажений.

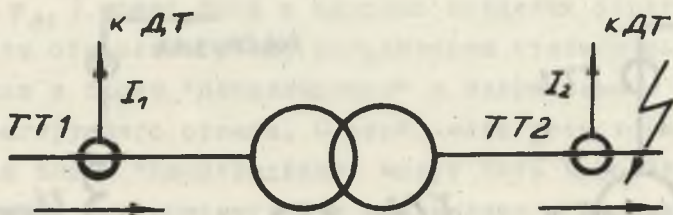


Рис. 12

Тогда

$$\psi_{\text{доп}} (\%) = \frac{I_1 - I_2}{I_1} \cdot 100\% \quad (9)$$

Здесь I_1 и I_2 - значения токов, при которых реле находится на грани ложного действия при внешнем коротком замыкании.

На рис. 13 приведена зависимость $\psi_{\text{доп}} = f(I_2)$, которую удалось получить на опытном экземпляре реле при некоторых значениях параметров его элементов. Как видно из рис. 13 при малых вытекающих из зоны действия токах защита теряет признак дифференциально-фазной, сохраняя прежний ток срабатывания. Это не опасно, т.к. погрешности в этом режиме малы и ложное действие исключено. В то же время отказа в действии защиты в описанных выше режимах при такой характеристике также опасаться не приходится.

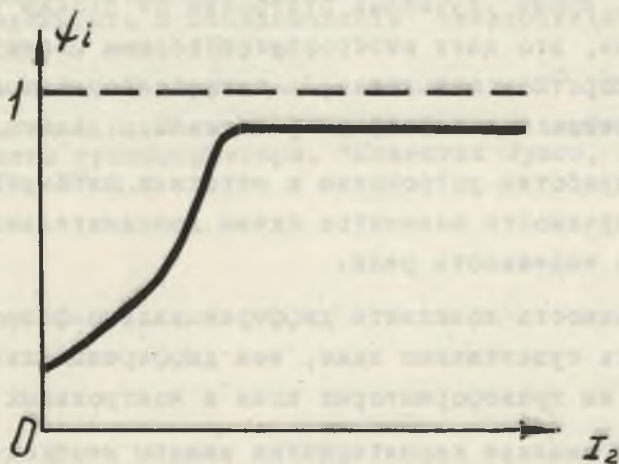


Рис. 13

6. Выводы

1) Применение дифференциально-фазных защит трансформаторов уменьшает объем вмешательства обслуживающего персонала и в значительной мере повышает эксплуатационную надежность защиты.

2) При разработке дифференциально-газных реле может быть эффективно использован метод логического анализа и синтеза схем.

3) Исследование логического блока "Несовпадение" описанной конструкции позволяет резко упростить схему и выполнить её без применения транзисторов, что дополнительно повышает аппаратную надежность устройств защиты. К тому же отпадает необходимость в стабилизированном блоке питания низкого напряжения.

4) При защите трансформаторов со схемой соединения звезда-треугольник в односистемном реле полезно использовать алгоритм взаимодействия схем в фазах, описываемый выражением (7). Кроме улучшения отстройки от броска тока намагничивания, это дает отстройку от обрыва цепей даже при внешнем коротком замыкании, а также обеспечивает значительное повышение надежности несрабатывания защиты.

5) Разработка устройства и методики автоматического контроля исправности элементов схемы дополнительно позволяет увеличить надежность реле.

6) Стоимость комплекта дифференциально-фазной защиты может быть существенно ниже, чем дифференциальной за счет экономии на трансформаторах тока и контрольных кабелях.

7) При анализе характеристик защиты необходимо учитывать возможность достижения повышенной чувствительности в режиме двухстороннего питания, что может быть весьма полезно при защите трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов.

8) Фазовая характеристика реле может регулироваться в широких пределах и, следовательно, может являться одной из уставок защиты.

9) Недостаток реле дифференциально-фазных защит трансформаторов - возможность отказа защиты при наличии выте-

кающего тока при внутреннем коротком замыкании. Этот недостаток может быть ликвидирован при соответствующем выборе характеристики " допускаяемой погрешности".

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дроздов А.Д. "Причины неправильной работы дифференциальных защит генераторов, трансформаторов и сборных шин. Электрические станции, 1968, № 3.
- [2] Колдуэлл С. Логический синтез релейных устройств. И.Л Москва, 1962.
- [3] Багинский Л.В. Шалин А.И. Реле дифференциальных защит содержащие нелинейные датчики тока в каждом плече. В сб. "Надежность и экономичность энергосистем", т.11, Новосибирск, изд. "Наука", 1970.
- [4] Биряков А.В., Подаруев А.И. Авт. свид, № 170100.
- [5] Ульяницкий Е.М. Логическое устройство дифференциальной защиты трансформатора. "Известия Вузов, Энергетика, 1970, № 2.

L.W. BAGINSKIJ, A.I. SZALIN
Nowosybirski Instytut Elektrotechniczny

ZABEZPIECZENIE PORÓWNAWCZO-FAZOWE TRANSFORMATORÓW I BLOKÓW GENERATOR - TRANSFORMATOR

S t r e s z c z e n i e

W związku ze znacznym wzrostem mocy układów elektroenergetycznych, a także z przechodzeniem na coraz to wyższe napięcia i stosowaniem kaskadowych przekładników prądowych, większość zabezpieczeń różnicowych transformatorów przestaje spełniać współczesne wymagania. Tłumaczyć to należy znacznym zwiększeniem prądu wyrównawczego i koniecznością odstrojenia zabezpieczeń od tego prądu. Prądy zwarciove przy zwarciach wewnętrznych w najniekorzystniejszym układzie pracy systemu na ogół są coraz mniejsze, w związku z czym czułość zabezpieczeń ma tendencję stałego obniżania się. Zmiany prądów wyrównawczych pociągają za sobą konieczność zmian nastawień zabezpieczeń, a także wymianę szeregu elementów prądowych układów zabezpieczeń (przekładniki, linie pilotowe itp.). Rośnie przy tym zakres obowiązków obsługi, co również znacznie obniża niezawodność zabezpieczeń [1].

Większość błędnych działań zabezpieczeń spowodowana jest błędami obsługi eksploatacyjnej. Dlatego uważa się, że zmniejszenie interwencji obsługi w tych przypadkach powinno być jednym z podstawowych wymagań na równi z odpowiednią czułością i selektywnością.

Niezawodność zabezpieczeń można poprawić, a interwencje obsługi znacznie zmniejszyć jeżeli wyeliminuje się konieczność zmian nastawień i wymiany elementów układów zabezpieczeń. Jednym z najbardziej efektywnych środków polepszenia wymaganej selektywności i czułości jest zastosowanie zabezpieczeń porównawczo-fazowych transformatorów.

W artykule podano przykłady logicznej syntezy dwóch układów zabezpieczeń porównawczo-fazowych, wykorzystujących metodę podaną w [2]:

- A. Zabezpieczenia porównawczo-fazowego transformatora trójzwojowego.
- B. Zabezpieczenia porównawczo-fazowego szyn zbiorczych.

Dla tych dwóch układów zabezpieczeń podano wyniki badań prototypowych przekaźników porównawczo-fazowych wykonanych bez zastosowania tranzystorów.

Podano analizę optymalizacji schematów strukturalnych jednosystemowego przekaźnika do zabezpieczeń transformatorów z punktu widzenia nie zawodności i czasu działania człomu rozruchowego.

Przeanalizowano ponadto możliwości niedziałania przekaźnika porównawczo-fazowego przy zwarcjach wewnętrznych.

Z przeprowadzonej analizy i badań przekaźników wynikają następujące wnioski:

1. Zastosowania zabezpieczeń porównawczo-fazowych transformatorów zmniejsza zakres interwencji obsługi i w znacznym stopniu zwiększa niezawodność zabezpieczenia.
2. Przy konstruowaniu przekaźników porównawczo-fazowych można korzystać z metody logicznej syntezy i analizy układów.
3. Zastosowanie logicznego bloku koincydencji umożliwia uproszczenie układu i wykonanie go bez stosowania tranzystorów, co w znacznym stopniu zwiększa niezawodność zabezpieczenia. W takim przypadku nie zachodzi konieczność stosowania niskiego napięcia ze stabilizowanego źródła zasilającego do zasilania układu tranzystorowego.
4. W przypadku zastosowania zabezpieczeń z przekaźnikiem jednosystemowym dla transformatorów o układzie połączeń gwiazda - trójkąt najlepiej jest wykorzystać algorytm wzajemnego współdziałania układów w poszczególnych fazach, opisany wyrażeniem (7).

Oprócz polepszenia odstrojenia od udaru prądu magnesującego powoduje to odstrojenie od skutków przerw w obwodach wtórnych zabezpieczeń, od wpływu prądu uchybowego wynikającego z przepływu prądu zwarciovego podczas zwarć zewnętrznych oraz zwiększenie pewności działania zabezpieczeń.

5. Sposób wykonania przekaźnika i automatyczna kontrola sprawności elementów układu pozwalają zwiększyć jego niezawodność.
6. Koszt kompletu zabezpieczenia porównawczo-fazowego może okazać się niższy niż zabezpieczenia różnicowego.
7. Przy analizie charakterystyk zabezpieczenia należy uwzględnić możliwość osiągnięcia większej czułości w przypadku dwustronnego zasilania, co może być korzystne przy zabezpieczeniu transformatorów trójzwojowych i autotransformatorów.
8. Charakterystyka fazowa przekaźnika może być regulowana w szerokich granicach i może być jednym z nastawialnych parametrów zabezpieczenia.
9. Główną wadą przekaźnika porównawczo-fazowego do zabezpieczeń transformatorów jest możliwość jego niedziałania w przypadku dużego wpływu prądu obciążenia przy małym prądzie zwarciovym (np. zwarcie zwojowe). Wadę tę można zlikwidować przez odpowiedni dobór charakterystyki uchybu dopuszczalnego.

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1. Schemat transformatora trójzwojowego

A,C,E - dodatnie półkresy prądów płynących po stronach I, II, III transformatora trójzwojowego

B,D,F - ujemne półkresy prądów płynących po stronach I,II,III transformatora trójzwojowego.

Rys. 2. Schemat blokowy zabezpieczenia porównawczo-fazowego transformatora trójzwojennego wykonanego w oparciu o elementy logiczne

DT - przetworniki prądowe, których ilość jest równa liczbie gałęzi zabezpieczenia (np. przekładniki pośredniczące, nasyceniowe lub liniowe)

$\forall\text{IV}$ - element iloczynu logicznego

несовпадение - koincydencja

PO - człon rozruchowy

ET - człon hamujący (stabilizujący)

Rys. 3. Schemat zastosowanego elementu logicznego - "koincydencja"

D_1, D_2 - diody

R_1, R_2 - oporniki gałęzi układu porównującego

C_1, C_2 - kondensatory

Rys. 4. Przykładowy schemat przekaźnika porównawczo-fazowego

Rys. 5. Schemat uproszczony zabezpieczenia porównawczo-fazowego szyn zbiorczych

III CB - wyłącznik sekcyjny

A, C, E, H, K - dodatnie półokresy prądów

B, D, F, I, L - ujemne półokresy prądów

Rys. 6. Schemat blokowy przekaźnika realizującego funkcje (5) i (6)

Rys. 7. Warianty schematów blokowych jednosystemowego przekaźnika porównawczo-fazowego do zabezpieczeń transformatorów

JIC - układy logiczne realizujące funkcję (1)

PO - człon rozruchowy

CA - układ realizujący algorytm (7)

Rys. 8. Schemat transformatora dwuzwojennego do analizy czułości zabezpieczenia przy zwarciach wewnętrznych

DT - przetworniki prądowe

Rys. 9. Zależność prądu rozruchowego przekaźnika od rozpiętości prądów w gałęziach zabezpieczenia

1 - charakterystyka I typu

2 - charakterystyka II typu

3 - charakterystyka III typu

Rys. 10. Charakterystyka prądowo-fazowa przełącznika

$\varphi\delta_1$ - kąt blokady

Rys. 11. a) Schemat zabezpieczonego transformatora trójzwojeniowego

TT1, TT2, TT3 - przekładniki prądowe

b) Schemat zastępczy transformatora

Przyjęto, że transformator trójzwojeniowy zasilany jest od strony średniego napięcia ze źródła o nieskończonej dużej mocy

Rys. 12. Schemat transformatora dwuzwojeniowego

Rys. 13. Charakterystyka $\psi_{\text{dop}} = f(I_2)$

ψ_{dop} - dopuszczalny uchyb zdefiniowany przy pomocy zależności (9)

L.W. BAGINSKI, A.I. SHALIN
Polytechnical Institute of Novosibirsk
Department of Electrical Engineering

PHASE - COMPARISON PROTECTION OF TRANSFORMERS
AND GENERATOR - TRANSFORMER UNITS

S u m m a r y

Significant increase of power as well as higher and higher voltages and cascade current transformers being applied in power systems strongly affect operation of transformers differential protections and make them stop fulfilling the requirements imposed. The reason is considerable increase of equalizing current. The protections must be insensitive to its value. The sensitivity of protections decreases because of diminishing of fault currents, which values during internal short circuits are smaller and smaller even in most unfavourable operating schemes of the system. Equalizing currents changes must be followed by changes of protection settings and also by the replacement of number of current elements of protections circuits such as measuring transformers, pilot lines etc. Moreover the duties of the staff are extended, which also results in reduced reliability of the protections [1].

The most of incorrect operations of the protections is caused by staff mistakes. Hence, there is opinion that reduction of staff interventions should become one of main requirements to fulfil, as well as sensitivity and selectivity.

Reliability can be improved and staff interventions reduced if there is no need of settings changeover and protection elements replacement. One of the most effective means of selectivity and sensitivity improvement is application of phase-comparison protections of the transformers.

In the paper there are given examples of logical synthesis of the two circuits of phase-comparison protections, designed according to the method presented in [2]:

- A. Phase-comparison protection of 3-winding transformer
- B. Phase-comparison protection of bus-bars

For these two protections, the test results of prototype phase-comparison relays without transistors are given.

There is presented analysis of optimization of structural schemes of single-system relay for transformer protection. The optimization is carried out from the point of view of reliability and operating time of starting element.

Moreover there are discussed cases of internal faults, during which phase-comparison relay does not operate.

From the analysis carried out and relay testing the following conclusions result:

1. Employment of phase - comparison protections of the transformers reduces staff interventions and considerably improves reliability of the protection.
2. When designing phase-comparison relays, the logical synthesis and analysis may be used.
3. Application of logical coincidence block makes the circuit simplified and enables design without transistors which significantly improves the reliability. In this case there is no need of stabilized low voltage supply as required for transistors.
4. In case of application of single-system relay protections for transformers star-delta connected the best thing is to employ algorithm of mutual cooperation of systems in individual phases, determined by equation (7).

It results in improvement of insensitivity to the magnetizing in-rush current. Moreover there are further advantages involved: insensitivity to the effects of breaks in secondary circuits of the

protection, insensitivity to the effects of error current caused by fault current during external faults and finally increase of protection reliability.

5. The design of the relay and automatic checking of system elements efficiency are helpful in obtaining increased reliability.
6. Cost of phase-comparison protection may be lower than that of differential protection.
7. The possibility of higher sensitivity obtaining in case of double - direction power supply should be taken into account when analysing protection characteristics. It may be useful for 3 - winding and auto-transformer protections.
8. Phase characteristic of the protection can be regulated within wide limits- thus becoming one of the adjustable parameters of the protection.
9. The main disadvantage of phase-comparison relay applied for transformers protections is possibility of its non-operation in case of high load current and low fault current (e.g. turn-to - turn short - circuit). The disadvantage can be removed by suitable choice of permissible error characteristic.

FIGURES DESCRIPTIONS

Fig. 1. 3-winding transformer schematic diagram

A,C, E - positive half-cycles of currents in I, II, III windings of 3-winding transformer

B,D,F - negative half-cycles of currents in I, II, III windings of 3-winding transformer

Fig. 2. Block diagram of phase-comparison protection of 3 - winding transformer. The protection based on logical elements

DT - current converters, the number of which is equal to number of protection branches (e.g. intermediary, saturizing or line measuring transformers)

ИИИ - AND logical element

НЕСОВПАДЕНИЕ - coincidence

PO - starting element

BT - breaking element (stabilizing)

Fig. 3. Schematic diagram of "coincidence" logical element

D_1, D_2 - blocking diodes

R_1, R_2 - resistors of comparison system branches

C_1, C_2 - capacitors

Fig. 4. Example of phase-comparison relay schematic diagram

Fig. 5. Simplified schematic diagram of phase-comparison protection of bus-bars

МCB - bus-bar section circuit-breaker

A, C, E, H, K - positive half - cycles of current

B, D, F, I, L - negative half-cycles of current

Fig. 6. Block diagram of the relay realizing logical functions (5) and (6)

Fig. 7. Block diagrams of single-system phase-comparison relay for transformers protections

ИИ - logical circuits realizing logical function (1)

PO - starting element

CA - circuit realizing algorithm (7)

Fig. 8. Schematic diagram of double-winding transformer for the analysis of protection sensitivity during internal faults;

DT - current converters

Fig. 9. Starting current of the relay versus current distribution in protection branches

1 - type I characteristic

2 - type II characteristic

3 - type III characteristic

Fig. 10. Current-phase characteristic of the relay

$\varphi\delta_1$ - interlock angle

Fig. 11. a) Schematic diagram of 3-winding transformer being protected

TT1, TT2, TT3 - current transformers

b) Equivalent scheme of the transformer

It was assumed that 3-winding transformer is fed from medium voltage side, the supply source being of infinite power

Fig. 12. Schematic diagram of 2-winding transformer

Fig. 13. $\varphi_{dop} = f(I_2)$ characteristic

φ_{dop} - permissible error determined by means of equation (9)