

Министерство образования и науки Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.Е. ГЛАЗЫРИН, А.А. ОСИНЦЕВ

ВЫПОЛНЕНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ
И ПОДСТАНЦИЙ

Утверждено
Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2017

УДК 621.316.925(075.8)
Г 525

Рецензенты:

канд. техн. наук, доцент *В.В. Медведков*
канд. техн. наук, доцент *В.А. Давыдов*

Работа подготовлена кафедрой электрических станций
для магистрантов факультета энергетики по направлению
«Электроэнергетика и электротехника»

Глазырин В.Е.

Г 525 Выполнение продольных дифференциальных защит электрооборудования электрических станций и подстанций: учебное пособие / В.Е. Глазырин, А.А. Осинцев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 71 с.

ISBN 978-5-7782-3448-2

В учебном пособии подробно рассмотрены вопросы функционирования продольной дифференциальной защиты сосредоточенного электрооборудования электрических станций и подстанций. Изложены принцип действия и средства обеспечения селективной работы в установившихся и переходных режимах. Описаны способы и средства обеспечения устойчивого функционирования современных микропроцессорных защит.

УДК 621.316.925(075.8)

ISBN 978-5-7782-3448-2

© Глазырин В.Е., Осинцев А.А., 2017
© Новосибирский государственный
технический университет, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. Принцип действия продольной дифференциальной защиты.....	5
2. Основные свойства продольной дифференциальной защиты	7
3. Способы отстройки от токов небаланса в установившихся режимах.....	10
4. Принцип торможения токами плеч в продольной дифференциальной защите.....	14
4.1. Условие допустимости использования принципа торможения	14
4.2. Схемы цепей блока торможения и тормозные характеристики.....	17
4.3. Способы формирования тормозного тока.....	21
5. Токи небаланса в переходном процессе и способы отстройки от них.....	27
5.1. Формирование тока небаланса.....	27
5.2. Признаки режима внешнего КЗ в переходных процессах.....	29
6. Технические средства отстройки от токов небаланса в переходных процессах	38
6.1. Использование активного добавочного сопротивления в дифференциальной цепи.....	39
6.2. Насыщающийся трансформатор тока.....	42
6.3. Влияние торможения токами плеч на устойчивость функционирования дифференциальной защиты в переходных процессах.....	49
7. Особенности дифференциальной защиты с направленным торможением	56
8. Общие принципы расчета дифференциальной защиты	58
8.1. Исходные положения.....	58
8.2. Ток срабатывания.....	59
8.3. Коэффициент торможения дифференциальной защиты.....	60
8.4. Ток излома тормозной характеристики.....	63
8.5. Определение коэффициента чувствительности.....	65
Библиографический список	70

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие предназначено для магистрантов, изучающих дисциплину «Релейная защита электроэнергетических систем». В связи с широким распространением микропроцессорных устройств релейной защиты в объектах энергетики различные фирмы выпускают большое количество вариантов защит электрооборудования электрических станций и подстанций, использующих дифференциальный принцип действия. В настоящем пособии рассмотрены основные свойства и принципы построения современных дифференциальных защит, переходные процессы в их цепях и поведение этих защит в переходных режимах. Рассмотрены принципы расчета параметров настройки, которые являются общими для большинства исполнений дифференциальных защит основного оборудования электрических станций и подстанций.

1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

Дифференциальная защита (ДЗ) обладает свойством абсолютной селективности и применяется в качестве основной защиты от всех видов внутренних коротких замыканий (КЗ), возникающих в оборудовании электрических станций и подстанций. КЗ часто сопровождаются большими токами (сверхтоками) и глубокими снижениями напряжения. Поэтому они представляют большую опасность для динамической устойчивости электроэнергетических систем (ЭЭС). Кроме того, сверхтоки могут вызывать значительные разрушения защищаемого оборудования. Поэтому такие КЗ должны отключаться без выдержки времени. Наиболее жесткие условия по быстродействию предъявляются к защитам объектов, КЗ на которых создает угрозу устойчивой работе ЭЭС. В этих случаях может потребоваться время срабатывания защиты в пределах 20...30 мс.

Принцип действия продольной дифференциальной защиты основан на пофазном контроле соблюдения первого закона Кирхгофа [1, 2]. В некоторых случаях контролируется соблюдение закона полного тока. Это обусловлено тем, что в исправном защищаемом объекте мгновенные значения токов каждой из фаз находятся в соотношениях, соответствующих этим законам.

Действительно, при внешних КЗ (рис. 1, точка К) соотношение токов любой из фаз (поврежденных и неповрежденных) всех ветвей защищаемого объекта определяется уравнением первого закона Кирхгофа

$$\sum_{j=1}^n i_j = 0 \quad (1)$$

или законом полного тока

$$\sum_{j=1}^n i_j w_j = 0. \quad (2)$$

где w_j – число витков рабочей обмотки ДЗ, подключенной к j -му плечу.

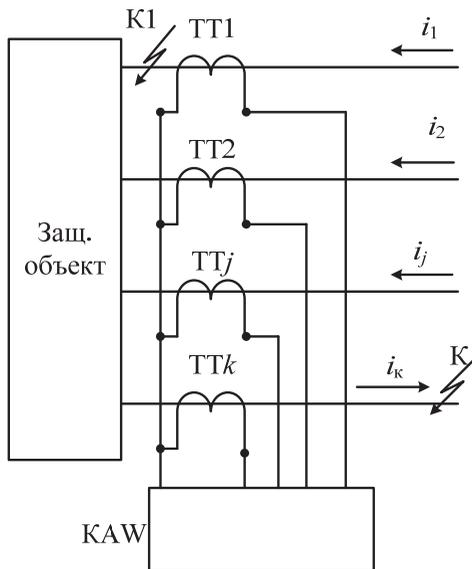


Рис. 1. Обобщенная схема подключения ДЗ

Если же КЗ возникает на защищаемом объекте (точка К1 на рис. 1), то ток повреждения перетекает с фазы на фазу (или на «землю») и пофазный баланс токов (или намагничивающих сил) в уравнениях (1) или (2) нарушается, поскольку в этих уравнениях не учтен ток, перетекающий на другую фазу (или на «землю»). Этот контроль осуществляется посредством суммирования вторичных токов i_{Bj} трансформаторов тока (ТТ), установленных на каждой ветви защищаемого объекта. При внешнем КЗ (точка К на рис. 1)

$$\sum_{j=1}^n i_{Bj} = \sum_{j=1}^n \frac{i_j}{n_{Tj}} \approx 0, \quad (3)$$

где n_{Tj} – коэффициент пропорциональности между токами i_j и i_{Bj} , состоящий из коэффициентов трансформации ТТ и других средств преобразования вторичных токов перед поступлением их на входы ДЗ.

Знак приблизительного равенства в условии (3) использован из-за различия сопротивлений плеч, неполного совпадения характеристик ТТ, а также средств преобразования вторичных токов. Поэтому при неповрежденном защищаемом объекте сумма вторичных токов равна так называемому току небаланса. Формируемый в устройстве защиты дифференциальный ток является суммой токов всех ветвей защищаемого объекта, а цепи, соединяющие устройство с ТТ защищаемого объекта, принято называть плечами защиты. Ток плеча, существующий при протекании по первичной обмотке ТТ данного плеча номинального тока защищаемого объекта, принято называть вторичным номинальным током плеча. В соответствии с условием (3) для нормального функционирования ДЗ необходимо равенство вторичных номинальных токов, т. е. во всех плечах значение n_{Tj} должно быть одинаковым.

В этом случае в уравнении (3) n_{Tj} может быть вынесено за знак суммы, и полученная сумма в соответствии с уравнением (1) равна нулю, т. е. токи плеч взаимно компенсируются. Однако не во всех случаях равенство вторичных номинальных токов удастся получить непосредственно после ТТ. Тогда возникает необходимость использования дополнительных средств преобразования токов плеч с коэффициентами передачи n_{pj} , после которых преобразованные токи подводятся непосредственно к устройству ДЗ. Из условия (3) и уравнения (1) следует, что

$$n_{Tj}n_{pj} = n_T. \quad (4)$$

Таким образом, результирующие коэффициенты преобразования первичных токов n_T всех ветвей защищаемого объекта во входные токи устройства ДЗ должны быть одинаковыми.

2. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

Основные свойства защиты характеризуют возможности ее действия ДЗ при использовании его на рассматриваемых защищаемых объектах: зону, на КЗ в которой она реагирует (зона действия защиты),

и параметры входных сигналов реагирующего органа (РО) в режимах тревоги (внешние и внутренние КЗ и другие режимы, сопровождающиеся сверхтоками) и дежурства (нормальный режим работы защищаемого объекта). Входные сигналы РО в режимах внутренних КЗ являются полезными сигналами (так как именно на них должна реагировать ДЗ), а в режимах внешних КЗ и в режимах дежурства – ложными сигналами, поскольку на защищаемом объекте нет повреждений, на которые должна реагировать ДЗ.

Зона действия защиты ограничена местами установки ТТ на ветвях защищаемого объекта. В самом деле, если перемещать точку К внешнего КЗ на схеме, показанной на рис. 1, в сторону защищаемого объекта, то условие (3) будет справедливым (т. е. ДЗ воспринимает КЗ как внешнее) лишь до тех пор, пока эта точка не пересечет место установки ТТк. Но как только точка КЗ окажется между ТТк и защищаемым объектом, баланс токов плеч нарушается, в дифференциальной цепи РО появляется ток (полезный сигнал) и ДЗ срабатывает. Из этого свойства следует, что при отсутствии трансформатора тока, вторичная обмотка которого соединена с устройством ДЗ, на какой-либо ветви вся эта ветвь (без ограничения) входит в зону защиты.

Величина полезного сигнала РО при внутренних КЗ (интенсивность полезного сигнала) равна току в месте КЗ в приведенных к числу витков вторичной обмотки значениях.

Следует отметить, что утверждение о величине полезного сигнала как сумме токов плеч справедливо только для частного случая работы защищаемого объекта на холостом ходу. Но подавляющее большинство КЗ происходит в рабочих режимах, когда защищаемый объект обтекается значительными токами нагрузки. При этом наиболее вероятны несимметричные КЗ. В несимметричном режиме в месте КЗ сохраняется напряжение прямой последовательности, под влиянием которого продолжают протекать токи нагрузки. Более того, в режимах внутренних симметричных КЗ трехобмоточных трансформаторов или автотрансформаторов со стороны низшего напряжения (которая, как правило, имеет значительное сопротивление обмотки) на остальных сторонах сохраняются значительные остаточные напряжения и, следовательно, токи нагрузки. Каждый из этих токов образует ток в соответствующем плече защищаемого объекта, который не может входить в состав полезного сигнала РО. Действительно, в таком режиме токи плеч можно представить в виде двух составляющих: тока нагрузки $i_{вн}$, который существует как в плечах питающих ветвей, так и в

плечах ветвей нагрузки, и составляющей тока КЗ $i_{\text{в}j\text{КЗ}}$, существующей только в плечах питающих ветвей. Тогда дифференциальный ток (см. рис. 1)

$$i_d = \sum_{j=1}^n i_{\text{в}j\text{н}} + \sum_{j=1}^n i_{\text{в}j\text{КЗ}} \equiv i_{\text{К1}}, \quad (5)$$

так как первое слагаемое равно нулю в соответствии с условием (3), а источники питающих ветвей образуют ток в месте КЗ.

В режиме внешнего КЗ мгновенные значения составляющей тока небаланса (ложный сигнал), возникающей за счет несовпадения характеристик ТТ и сопротивлений нагрузки на ТТ, равны алгебраической сумме мгновенных значений намагничивающих токов всех ТТ устройства ДЗ.

Если выразить левую часть уравнения (3) через приведенные к числу витков вторичной обмотки мгновенные значения первичного и намагничивающего токов, то получим

$$\sum_{j=1}^n i_{\text{в}j} = \sum_{j=1}^n (i'_j - i'_{\text{в}j}) = - \sum_{j=1}^n i'_{\text{в}j} = i_{\text{нб}}. \quad (6)$$

В режиме внешнего КЗ (точка К на рис. 1) можно разделить все ветви первичной цепи по признаку наличия источника питания в них – на m питающих и p поврежденных ветвей. Тогда с учетом условно-положительных направлений токов в схеме рис. 1 получим

$$i_{\text{нб}} = \sum_p i'_{\text{м}p} - \sum_m i'_{\text{м}m}. \quad (7)$$

Из этого следует, что если принять в качестве положительного направления направление тока при внешнем КЗ (т. е. направление *сквозного тока*), то ток небаланса можно будет определить как разность мгновенных значений намагничивающих токов ТТ поврежденной ветви (ветвей) и ТТ питающих ветвей. Надо отметить, что в ДЗ объектов разного типа могут быть и другие составляющие тока небаланса, свойственные объектам именно данного типа.

При обрыве цепи какого-либо плеча в устройстве ДЗ появляется дифференциальный ток (ложный сигнал), равный тому току, кото-

рый протекал бы по данному плечу при отсутствии повреждения в нем, и противоположный по отношению к нему.

Это свойство является следствием первого свойства ДЗ, поскольку отсутствие информации о токе ветви для ДЗ равнозначно отсутствию ТТ на этой ветви, а ток, протекающий по ней, воспринимается как ток КЗ в зоне защиты. В самом деле, если j обозначает неповрежденные плечи ДЗ, f обозначает поврежденное плечо, то до возникновения повреждения на основании условия (3) имеем

$$\sum_{j=1}^n i_{Bj} + i_{Bf} \approx 0.$$

Следовательно, при исчезновении i_{Bj}

$$\sum_{j=1}^n i_{Bj} \approx -i_{Bf}. \quad (8)$$

Для устойчивого функционирования ДЗ должна быть надежно отстроена от ложных сигналов и уверенно срабатывать от полезного сигнала, возникающего при внутреннем повреждении защищаемого объекта.

3. СПОСОБЫ ОТСТРОЙКИ ОТ ТОКОВ НЕБАЛАНСА В УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ

Относительное значение составляющей тока небаланса, обусловленной различием намагничивающих токов ТТ, не превышает 10 %, поскольку эта величина является предельно допустимой по условиям выбора ТТ для ДЗ. Поэтому расчетный ток небаланса в установившемся процессе определяется следующим выражением:

$$I_{\text{нб.расч}} = k_0 \varepsilon I_{\text{расч}}, \quad (9)$$

где $I_{\text{расч}}$ – максимальный сквозной ток в защищаемом объекте в расчетном режиме; ε – полная погрешность ТТ в расчетных условиях; k_0 – коэффициент однотипности, учитывающий степень несовпадения

характеристик ТТ, а также различие в условиях функционирования ТТ питающих ветвей, с одной стороны, и ТТ поврежденных ветвей – с другой. При существующих различиях этих факторов $k_0 = 1$, а в противном случае $k_0 = 0,5$.

Для уменьшения тока небаланса, как следует из выражения (6), надо по возможности снижать величины намагничивающих токов ТТ. Поэтому для ДЗ используются ТТ класса Р, имеющие достаточно большой объем стали. Ток намагничивания ТТ можно уменьшить снижением нагрузки на них, но такой метод уменьшения тока небаланса, как правило, на практике не используется из-за увеличения затрат на кабельные связи. Однако такие мероприятия не приводят к сближению характеристик ТТ и, следовательно, существенно снизить величину тока небаланса не могут.

Простейший способ уменьшить различие величин намагничивающих токов ТТ – это использовать добавочное сопротивление в дифференциальной цепи. Следует отметить, что механизм влияния добавочного сопротивления на ток небаланса существенно отличается от механизма влияния на ток в цепях, питаемых от источника напряжения. Рассмотрим механизм влияния этого сопротивления на ток небаланса при значительном несовпадении характеристик ТТ на примере ДЗ с двумя плечами (рис. 2а). На рис. 2б показаны характеристики намагничивания ТТА и ТТБ, причем ТТА имеет более высококачественную характеристику, поскольку заданная ЭДС ТТА достигается при гораздо меньшей величине намагничивающего тока, чем у ТТБ. При этом может оказаться, что контрольный кабель плеча Б, с помощью которого ТТБ соединен с дифференциальной цепью, значительно длиннее, чем у плеча А, т. е. соотношение сопротивлений плеч определяется неравенством $R_B > R_A$. Именно этот случай иллюстрируется на рис. 2б. Тогда при отсутствии добавочного сопротивления R_D ЭДС ТТБ больше ЭДС ТТА, поскольку $E'_A \approx I_{BA} R_A$ и $E'_B \approx I_{BB} R_B$ при $I_{BA} \approx I_{BB}$; в таком же соотношении в соответствии с рис. 2, б находятся и намагничивающие токи.

Поэтому ток плеча А несколько больше тока плеча Б, а следовательно, направление тока небаланса совпадает с направлением тока плеча А. Такое же направление ток небаланса сохраняет и при наличии добавочного сопротивления в дифференциальной цепи. Из этого следует, что ЭДС ТТА при использовании такого сопротивления E_A

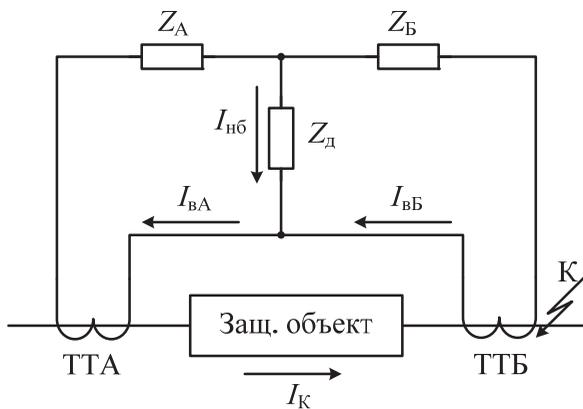


Рис. 2а. Расчетная схема двухплечевой ДЗ с активным сопротивлением в дифференциальной цепи

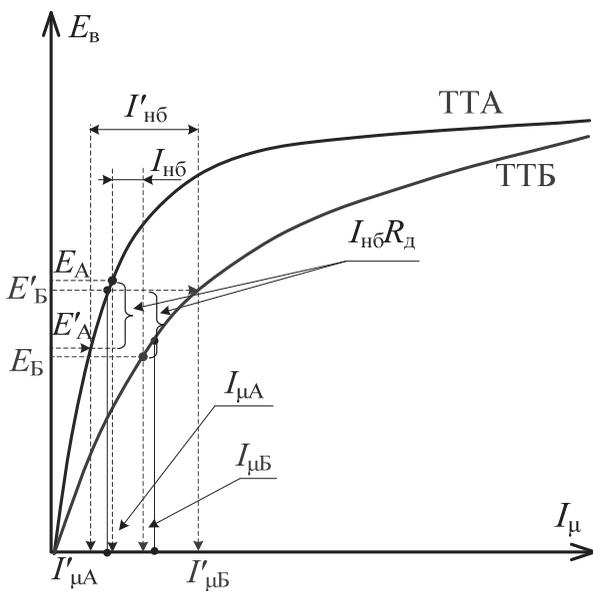


Рис. 2б. Характеристики намагничивания ТТА и ТТБ

возрастает за счет падения напряжения от тока небаланса на этом сопротивлении, а ЭДС ТТБ E_B – уменьшается, что вызывает сближение величин намагничивающих токов ТТА и ТТБ, т. е. уменьшение тока небаланса. Этот эффект проявляется сильнее, если падение напряжения на нем совпадает по фазе с падением напряжения на сопротивлении плеча. Поэтому целесообразно применять активное добавочное сопротивление R_D . Действительно, в соответствии с вторым законом Кирхгофа получаются следующие величины этих ЭДС (с учетом того, что $I_{BA} \approx I_{BB} \approx I_B$):

$$E_A \approx I_B R_A + I_{нб} R_D,$$

$$E_B \approx I_B R_B - I_{нб} R_D.$$

Таким образом, ЭДС ТТА и ТТБ изменяются на одну и ту же величину падения напряжения на добавочном сопротивлении, но в противоположных направлениях. Поскольку первая из них возрастает, увеличивается и $I_{\mu A}$, а вследствие уменьшения ЭДС ТТБ снижается величина $I_{\mu B}$. Это и служит причиной уменьшения тока небаланса при использовании рассмотренного способа (см. рис. 2б).

Следует отметить, что этим способом невозможно полностью устранить ток небаланса. Полностью ток небаланса устраняется при $R_D = \infty$, что недопустимо. Но даже и значительная величина этого сопротивления неприемлема, так как это вызывает недопустимую перегрузку ТТ. Это может вызвать их глубокое насыщение и такую степень искажения тока в дифференциальной цепи РО, при которой он может не сработать. При этом также возникают перенапряжения, опасные для персонала и электрооборудования. Поэтому при использовании этого метода ограничения тока небаланса следует проверять величину токовой погрешности ТТ в режиме внутренних КЗ и сравнивать ее с предельно допустимой для РО, примененного в данной ДЗ. Практически активные добавочные сопротивления величиной 5...10 Ом используются в ДЗ генераторов малой мощности.

Для предотвращения насыщения ТТ в режиме внутренних КЗ вследствие перегрузки их добавочным сопротивлением в дифференциальной цепи некоторые фирмы использовали сопротивления с нелинейной характеристикой или в сочетании с ограничителем напряжения [4].

При этом напряжение на добавочном сопротивлении ограничивалось такой величиной, при которой ТТ не мог насыщаться и не возникала угроза пробоя изоляции токовых цепей. Другие фирмы использовали добавочное сопротивление в дифференциальной цепи промежуточных ТТ, которые гальванически отделяют внутренние цепи РО ДЗ от вторичных цепей основных ТТ.

Еще одним ограничением применения добавочных сопротивлений в дифференциальных цепях ДЗ является необходимость равенства вторичных номинальных токов. При неравенстве этих токов в режиме внешних КЗ постоянно существует ток небаланса (даже при абсолютном совпадении характеристик ТТ), вызванный этим неравенством. Падение напряжения на добавочном сопротивлении от этого тока увеличивает ЭДС ТТ плеча с большим током и уменьшает ЭДС ТТ противоположного плеча (плеч). Это может вызвать увеличение тока небаланса.

Наиболее распространенным методом отстройки от токов небаланса установившегося процесса в продольных ДЗ является метод торможения токами плеч. Принцип этого метода заключается в следующем. Величина тока небаланса в соответствии с выражением (9) возрастает с повышением сквозного тока, протекающего в защищаемом объекте, так как при этом увеличиваются намагничивающие токи ТТ. Поэтому для отстройки от тока небаланса целесообразно увеличивать ток срабатывания вместе с ростом сквозного тока в защищаемом объекте таким способом, чтобы при любом токе внешнего КЗ ток срабатывания ДЗ превышал ток небаланса. Поскольку ток КЗ обязательно трансформируется в плечи ДЗ, торможение осуществляется токами ее плеч, которые используются для противодействия срабатыванию РО ДЗ.

4. ПРИНЦИП ТОРМОЖЕНИЯ ТОКАМИ ПЛЕЧ В ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЕ

4.1. УСЛОВИЕ ДОПУСТИМОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИНЦИПА ТОРМОЖЕНИЯ

Несмотря на очевидную целесообразность использования торможения для отстройки от токов небаланса, применять его в продольной ДЗ можно лишь при том общем условии, что оно приведет к повышению чувствительности ДЗ к внутренним КЗ. Однако применение тор-

можения само по себе еще не обеспечивает повышения чувствительности, так как при внутренних КЗ в плечах защиты (хотя бы в одном плече) непременно существует ток. Торможение в общем случае существует и в режиме внутреннего КЗ, т. е. торможение может увеличивать ток срабатывания и в этом режиме, снижая чувствительность. Поэтому торможение эффективно лишь при условии, если оно, обеспечивая отстройку от токов небаланса при внешних КЗ, в незначительной (допустимой) степени увеличивает ток срабатывания в режимах внутренних КЗ. Это означает, что интенсивность торможения должна быть строго дозированной (ограниченной), чтобы величина тока срабатывания при внутренних КЗ была приемлемой, но достаточной для отстройки от токов небаланса в режимах внешних КЗ. Принцип торможения и заключается в реализации этого условия. Возможность его реализации в установившихся режимах состоит в том, что ток небаланса образуется как разность токов плеч, т. е. в приведенном значении (к числу витков первичной обмотки ТТ) есть часть тока КЗ, в то время как ток в дифференциальной цепи в режиме внутренних КЗ равен току в месте КЗ. Даже в ДЗ трансформаторов, в которых ток небаланса может существенно превышать величину разности намагничивающих токов в установившихся режимах, его значение не превышает 35 % от первичного тока. Поэтому существует возможность выбрать такую интенсивность торможения, при которой ток срабатывания в режимах внешних КЗ больше тока небаланса, а в режимах внутренних – меньше тока в дифференциальной цепи, пропорционального току в месте КЗ.

На рис. 3 графически проиллюстрирован принцип торможения. Расчетный ток небаланса линейно возрастает с увеличением тормозного тока I_T [см. выражение (9)], который пропорционален первичному току. Ток срабатывания I_c при расчетном токе внешнего КЗ более чем в 1,5 раза превышает расчетный ток небаланса. Зависимость $I_c(I_T)$, которая называется тормозной характеристикой, показана для условий, когда ток небаланса достигает 30 % от сквозного тока КЗ, а зависимость тока в РО в режиме внутренних КЗ (полезный сигнал) $I_p(I_T)$ – когда весь ток КЗ образует тормозной ток. При построении последней зависимости предполагалось, что дифференциальный ток уменьшается по отношению к расчетному значению за счет переходного сопротивления в месте КЗ, а расчетный вид – несимметричное КЗ. При таком

внутреннем КЗ ток нагрузки сохраняется даже при отсутствии переходного сопротивления. По мере роста переходного сопротивления напряжение в месте КЗ повышается и восстанавливается питание нагрузки. В первом приближении принято, что характер нагрузки – статический, и в пределе ток нагрузки достигает номинального значения. Как показано на рис. 3, даже в таких сложных условиях при расчетном токе внутреннего КЗ ток в реагирующем органе более чем в 2 раза превышает ток срабатывания защиты, если ДЗ отстроена от тока небаланса с коэффициентом надежности (запаса) 1,5.

Степень использования тормозного тока (дозирование) для отстройки от тока небаланса ДЗ устанавливается коэффициентом торможения K_T , который определяется тангенсом угла наклона тормозной характеристики (см. рис. 3):

$$K_T = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_T} = \operatorname{tg} \beta. \quad (10)$$

Значение тока срабатывания при отсутствии торможения I_c называется начальным током срабатывания I_{CH} .

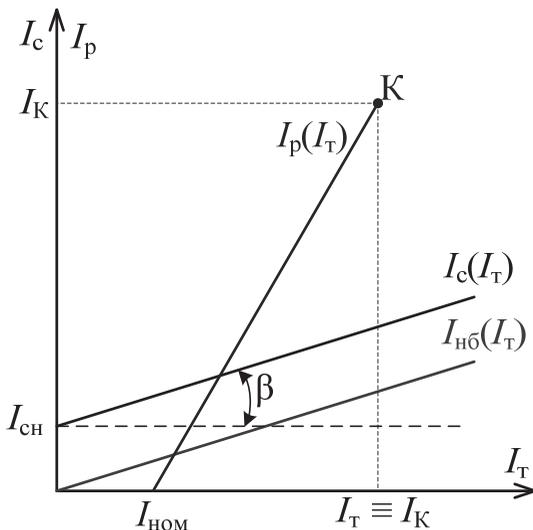


Рис. 3. Иллюстрация принципа торможения ДЗ

В настоящее время принцип торможения токами плеч широко применяется в ДЗ основного электрооборудования электрических станций и подстанций, причем разработано множество способов его реализации. Практически во всех разработках основной целью является снижение торможения в режимах внутренних КЗ с одновременным обеспечением достаточного торможения для отстройки от токов небаланса. Варианты исполнения ДЗ с использованием торможения токами плеч (ДЗТ) можно классифицировать по следующим признакам:

- по характеру схемы цепей блока торможения, т. е. используются ли токи всех плеч или только части из них для формирования тормозного тока;
- по виду тормозной характеристики;
- по способу формирования тормозной характеристики.

4.2. СХЕМЫ ЦЕПЕЙ БЛОКА ТОРМОЖЕНИЯ И ТОРМОЗНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Схемы токовых цепей, в которых тормозной ток формируется из токов всех плеч ДЗТ, принято называть симметричными, а в противном случае – несимметричными. Простейшей несимметричной схемой торможения является схема, в которой тормозной ток – это ток одного плеча. Именно такая схема рассмотрена в разд. 4.1 в качестве ДЗ трансформатора (рис. 4а). Симметричная схема, как правило, содержит промежуточные ТТ в плечах ДЗТ ($ТЛ_A$, $ТЛ_B$ на рис. 4б), которые изолируют внутренние цепи ДЗТ от вторичных цепей ТТ и используются также для уравнивания коэффициентов преобразования первичных токов во входные цепи ДЗ в соответствии с условием (4).

Свойства этих схем иллюстрируются на рис. 4а и 4б. На рис. 4а показана простейшая схема токовых цепей ДЗТ двухконцевого объекта с несимметричным торможением (тормозным током является вторичный ток ТТА). Тормозной ток в режиме внешнего КЗ (точка К) не отличается от тормозного тока в режиме внутреннего КЗ (точка К1), если величина токов обоих режимов одинакова, причем в режиме внутреннего КЗ при отсутствии питания со стороны ТТБ этот же ток протекает и в дифференциальной цепи. Однако если в качестве тормозного тока используется ток плеча Б, то торможение в последнем случае отсутствует.

На рис. 4б представлена упрощенная схема цепей симметричного торможения при условиях, аналогичных показанным на рис. 4а. Основным отличием этой схемы является наличие формирователя тормозного

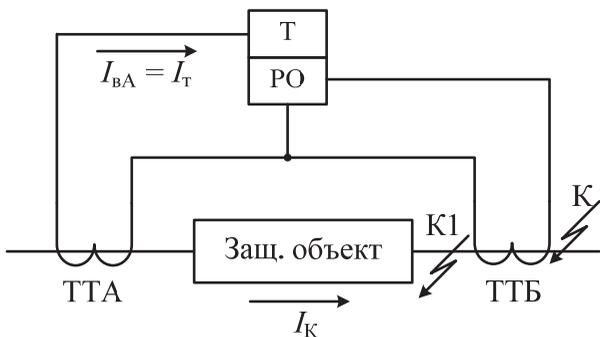


Рис. 4а. Пример схемы токовых цепей с несимметричным торможением

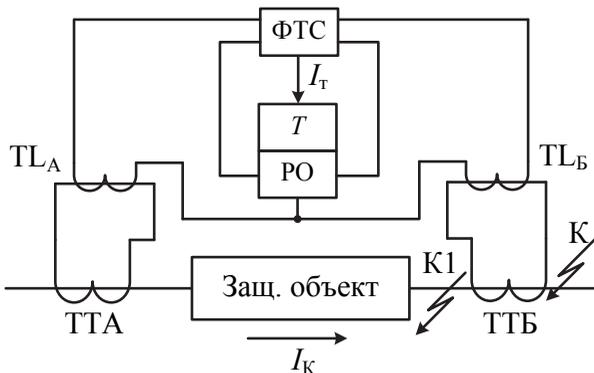


Рис. 4б. Пример схемы токовых цепей с симметричным торможением

сигнала (ФТС), к которому подведены токи всех плеч (через промежуточные ТТ TL , включенные в каждое плечо ДЗТ). Поэтому в режимах внешних КЗ тормозной ток образуется вторичными токами как $TТA$, так и $TТБ$, каждый из которых является трансформированным током КЗ в точке К. Поэтому тормозной ток пропорционален удвоенному значению тока внешнего КЗ, приведенного к числу витков вторичной обмотки ТТ. В то же время при внутренних КЗ ток в месте повреждения (суммарный ток КЗ) равен сумме токов питающих ветвей, каждый из которых образует ток плеча. В этом режиме дифференциальный ток

пропорционален току в месте КЗ (суммарному току КЗ). Поэтому при отсутствии тока нагрузки в рассматриваемом режиме тормозной ток также пропорционален току в месте КЗ и приблизительно равен дифференциальному току.

Таким образом, в режиме внутреннего КЗ при прочих равных условиях отношение тормозного тока к дифференциальному для обеих схем одинаковое, а в режимах внешних КЗ в симметричной схеме тормозной ток вдвое больше, чем в несимметричной.

Тормозные характеристики целесообразно классифицировать по признаку зависимости коэффициента торможения K_T от тормозного тока. Если K_T расчетной тормозной характеристики не зависит от тормозного тока, тормозная характеристика называется линейной (или простой), в противном случае – нелинейной (или сложной). Следует отметить, что название «нелинейная» тормозная характеристика не совсем точное, поскольку в настоящее время используются нелинейные тормозные характеристики вида «ломаная прямая», т. е. на определенных интервалах изменения тормозного тока сохраняется независимость K_T от него, но за пределами данного интервала K_T изменяется. Даже в тех случаях, когда устройство, формирующее тормозную характеристику, в силу своих физических свойств не в состоянии обеспечить линейность характеристики $I_c(I_T)$, расчетную характеристику спрямляют. На рис. 5 в качестве примера линейной тормозной характеристики показана линия 1, а нелинейной – линия 2. Горизонтальный (или слабонаклонный) участок нелинейной характеристики предназначен для повышения чувствительности при внутренних КЗ с малыми токами (например, при витковых замыканиях в трансформаторах) за счет отсутствия (или существенно ослабленного) торможения.

Для характеристики 2 возможны различные варианты (*a*, *b*, *в*) после определенного уровня тормозного сигнала (I_n). Вариант *a* – продолжение характеристики с неизменным коэффициентом торможения. Вертикальная ветвь характеристики (вариант *b*) обычно используется в тех случаях, когда ДЗ выполнена в виде двух каналов: ДЗТ и дифференциальной отсечки (ДО), причем ДО – это ДЗ без торможения. В таком случае при токах внутренних КЗ, на которые уверенно реагирует ДО, канал ДЗТ выводят из действия (блокируют), чтобы не отстраивать ДЗТ от максимальных токов небаланса, и тормозная характеристика на этом участке имеет вид вертикальной прямой. Вертикальная ветвь тормозной характеристики ограничивает зону чувствительности

(«ответственности») канала ДЗТ. Блокирование канала ДЗТ может применяться и при меньших токах, чем ток срабатывания ДО, если есть уверенность в том, что способ формирования тормозного тока обеспечивает снятие тормозного сигнала при любом внутреннем КЗ за время, меньшее времени срабатывания защиты.

Если защищаемый объект обладает собственным сопротивлением, которое существенно ограничивает максимальный ток внешнего КЗ, то нет смысла увеличивать ток срабатывания ДЗТ при превышении такого тока КЗ в защищаемом объекте. Очевидно, что если ток КЗ превышает максимально возможное значение тока КЗ за сопротивлением защищаемого объекта, то КЗ находится либо в самом защищаемом объекте, либо до него, т. е. в зоне защиты. Поэтому целесообразно при токе, равном максимальному току КЗ за защищаемым объектом, ограничить действие торможения, но не прекращать его (т. е. ДЗТ не блокируется, а ток срабатывания остается такой же величины, как и при КЗ за защищаемым объектом). В этом случае тормозная характеристика будет иметь вид горизонтальной прямой (вариант в).

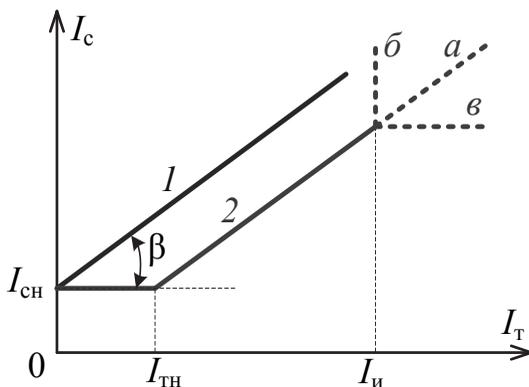


Рис. 5. Варианты исполнения тормозных характеристик ДЗ

Линейная тормозная характеристика (линия 1, рис. 5) описывается следующим уравнением:

$$I_c = I_{сн} + K_T I_T, \quad (11)$$

где $K_T = \text{tg}\beta$; $I_{сн}$ — начальный ток срабатывания.

Уравнение нелинейной тормозной характеристики на участке торможения (т. е. на интервале, где ток срабатывания возрастает под воздействием тормозного тока) в простейшем случае имеет вид

$$I_c = I_{сн} + K_T (I_T - I_{тн}), \quad (12)$$

где $I_{тн}$ – начальный ток торможения.

Уравнение нелинейной тормозной характеристики на всем возможном диапазоне изменения тока торможения (по варианту *a* на рис. 5) может быть задано уравнениями прямых, соответствующих отдельным интервалам значений аргумента. Оно имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} I_c &= I_{сн} && \text{при } I_T \leq I_{тн} \\ I_c &= I_{сн} + K_T (I_T - I_{тн}) && \text{при } I_T > I_{тн}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Уравнения характеристик вариантов *б* и *в* отличаются только описаниями последнего (третьего) интервала.

Уравнение тормозной характеристики по варианту *б*:

$$\left. \begin{aligned} I_c &= I_{сн} && \text{при } I_T \leq I_{тн} \\ I_c &= I_{сн} + K_T (I_T - I_{тн}) && \text{при } I_{и} \geq I_T > I_{тн} \\ I_c &= \infty && \text{при } I_T \geq I_{и}, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где $I_{и}$ – значение тормозного сигнала, при котором происходит излом характеристики.

Уравнение тормозной характеристики по варианту *в*:

$$\left. \begin{aligned} I_c &= I_{сн} && \text{при } I_T \leq I_{тн} \\ I_c &= I_{сн} + K_T (I_T - I_{тн}) && \text{при } I_{и} \geq I_T > I_{тн} \\ I_c &= I_{сн} && \text{при } I_T \geq I_{и}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

4.3. СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТОРМОЗНОГО ТОКА

В простейших несимметричных системах торможения ток плеча непосредственно используется в качестве тормозного тока для формирования линейной тормозной характеристики вида *l* на рис. 5. В более сложных несимметричных системах торможения используется нели-

нейная характеристика, например, вида $2a$ (см. рис. 5). Тогда ток плеча (или токи плеч) выпрямляется в формирователе тормозного сигнала, который формирует тормозную характеристику заданной конфигурации и с необходимыми параметрами.

Дифференциальная защита с симметричной схемой торможения, как правило, использует нелинейную тормозную характеристику. Однако первоначально симметричная схема торможения выполнялась с использованием простейших средств и с линейной тормозной характеристикой. Такая схема получила название схемы торможения циркулирующим током и могла использоваться только для защиты двухконцевых объектов. Эта схема показана на рис. 6, причем устройство торможения выполнено в виде двух обмоток Т, расположенных на одном стержне, но включенных в разные плечи. Циркулирующим током $i_{ц}$ принято называть среднее мгновенное значение токов плеч двухплечевой защиты при условно-положительном направлении первичного тока, соответствующего внешнему КЗ:

$$i_{ц} = 0,5(i_{пл.А} + i_{пл.Б}) .$$

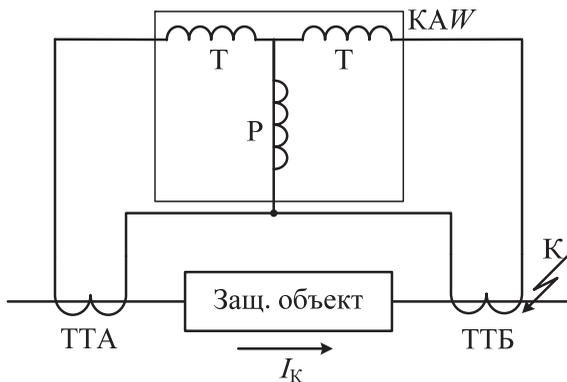


Рис. 6. Схема ДЗ с торможением циркулирующим током

В режиме внешнего КЗ каждый из токов плеч протекает по своему тормозному входу, образуя двойное тормозное воздействие на реагирующий орган ДЗТ от тока КЗ в точке К (см. рис. 6), как и в любой симметричной схеме торможения. Точно так же в режиме внутреннего

КЗ с односторонним питанием в соответствии со свойством схемы симметричного торможения тормозной ток пропорционален току в месте КЗ. Однако в режиме внутреннего КЗ с двусторонним питанием один из токов плеч изменяет свое направление на обратное, МДС тормозных обмоток в значительной мере взаимно компенсируются и тормозной эффект существенно (более чем в 2 раза) уменьшается по сравнению с током в месте внутреннего КЗ. Если в режиме внутреннего КЗ с двусторонним питанием токи, притекающие от обоих источников, приблизительно одинаковые и совпадают по фазе, тормозной эффект в этом режиме практически отсутствует. Это свойство схемы с торможением циркулирующими токами весьма ценно, так как именно при двустороннем питании внутреннего КЗ может возникать угроза динамической устойчивости ЭЭС, и необходимо максимальное быстродействие защит. Однако большим недостатком схемы с торможением циркулирующим током является неприспособленность ее к использованию в защите многоконцевых объектов.

В настоящее время повсеместное распространение для ДЗТ многоконцевых объектов с многосторонним питанием получили два способа формирования тормозных токов при симметричной системе торможения:

- из выпрямленных токов плеч;
- с использованием основной гармонической составляющей токов плеч.

Существует много вариантов формирования тормозных токов из выпрямленных токов всех плеч и дифференциального тока. Однако эффективность всех этих вариантов эквивалентна так называемому базовому способу формирования, алгоритм которого описывается следующим выражением:

$$I_T = \sum_{j=1}^n |I_j|, \quad (16)$$

где $|I_j|$ – модуль тока j -го плеча ДЗ; n – количество плеч ДЗТ.

В общем случае все способы формирования тормозного тока из выпрямленных токов плеч при нелинейной тормозной характеристике (на ее восходящей ветви) можно описать следующим выражением:

$$\Delta I_T = f(|I_j|) - I_{ТН},$$

где $|I_j|$ – модуль тока j -го плеча.

При этом торможение успешно выполняет возложенную на него функцию отстройки от расчетного тока небаланса, если получаемый при текущем (расчетном) уровне тормозного сигнала ток срабатывания с определенным запасом, который обычно задается коэффициентом надежности (запаса) K_n , превышает ток небаланса, т. е.

$$K_n I_{нб.р} \leq I_{сн} + K_T \Delta I_T.$$

Отсюда с учетом формул (9) и (10) получаем

$$K_T \geq \frac{K_n K_o I_{кр} \varepsilon - I_{сн}}{f(|I_j|) - I_{тн}}. \quad (17)$$

В конечном счете эффективность торможения должна оцениваться величинами коэффициентов чувствительности, свойственных различным способам формирования тормозного тока, при равной степени отстроенности от тока небаланса. При этом расчетный по чувствительности ток КЗ должен быть принят одинаковым для всех сравниваемых вариантов.

Тогда формула, описывающая коэффициент чувствительности K_q при данном способе формирования тормозного тока в общем виде [с использованием формулы (12)], имеет вид

$$K_q = \frac{I_{к\min}}{I_c} \approx \frac{I_{к\min}}{I + \frac{K_n K_o I_{кр} \varepsilon - I_{сн}}{f(|I_j|) - I_{тн}}} = \frac{I_{к\min}}{K_n K_o I_{кр} \varepsilon}.$$

Таким образом, коэффициент чувствительности практически не зависит от способа формирования тормозного тока из выпрямленных токов плеч. Следовательно, целесообразно использовать простейший из этих способов, т. е. базовый способ в соответствии с формулой (16).

Свойства тормозного тока при рассматриваемом способе торможения наиболее полно соответствуют описанным выше свойствам симметричной схемы торможения. Некоторое различие заключается в том, что при возникновении КЗ в процессе эксплуатации токи от разных источников, как правило, не совпадают по фазе и сумма их модулей больше суммарного тока КЗ. Поэтому при внутренних КЗ тормозной ток больше тока в месте КЗ, как и при внешних (при защите многокон-

цевых объектов с многосторонним питанием), больше, чем удвоенный ток КЗ. Но следует отметить, что рассмотренный способ формирования тормозного тока не может обеспечить снижение торможения при внутренних КЗ с дву- или многосторонним питанием по сравнению с модулем тока в месте КЗ. Формирование тормозного тока из первых гармоник токов плеч дает такую возможность. Кроме того, важно иметь повышенную чувствительность ДЗТ к токам внутренних повреждений, вызывающих дифференциальные сигналы небольшой интенсивности (витковые замыкания, КЗ через переходное сопротивление), а также в режиме опробования защищаемого объекта. Этой цели соответствует наличие начального горизонтального участка в нелинейной тормозной характеристике, так как при $I_{ТН} \geq I_{ТНОМ}$ ($I_{ТНОМ}$ – ток торможения при номинальной нагрузке защищаемого объекта) ток нагрузки не вызывает увеличения тока срабатывания. Однако при внутреннем повреждении в режиме максимальной нагрузки защищаемого объекта возможно снижение напряжения, что может сопровождаться увеличением тока нагрузки, и, следовательно, ток срабатывания может возрасти. Кроме того, в режиме опробования вполне возможен ток КЗ, превышающий ток максимальной перегрузки защищаемого объекта, и тогда $I_T \geq I_{ТН}$, т. е. ток срабатывания возрастает.

Более чувствительной в таких режимах является ДЗТ со следующим способом формирования тормозного сигнала из первой гармоники токов плеч:

$$I_T = \sqrt{I_1 I_2 \cos \alpha}, \quad (18)$$

где $I_1 = \max(I_j)$; $I_2 = \sum_j I_j - I_1$; $\alpha = \arg(I_1) - \arg(-I_2)$; при $\cos \alpha < 0$

производится обнуление тормозного тока: $I_T = 0$.

Этот способ известен как «направленное торможение».

Свойства направленного торможения проявляются в следующих режимах. При работе защищаемого объекта в ЭЭС внутреннее КЗ имеет дву- или многостороннее питание и $\alpha \geq 90^\circ$, а $I_T = 0$. В тех редких случаях, когда $\alpha < 90^\circ$, один из источников питания электрически весьма удален от защищаемого объекта и ток от него очень мал, а значит, мал и тормозной ток. В режиме неуспешного опробования $I_2 = 0$

и, следовательно, $I_T = 0$, а при несимметричном внутреннем КЗ с односторонним питанием с малым током повреждения, но с сохранением тока нагрузки формируемые токи \dot{I}_1 и \dot{I}_2 , как правило, существенно не совпадают по фазе и $\cos \alpha < 1$, т. е. тормозной ток мал. При двустороннем питании внутреннего повреждения, как правило, величина α зависит в основном от одного из компонентов тока КЗ, а значит, $\cos \alpha < 0$. Таким образом, свойства направленного торможения близки к свойствам торможения циркулирующим током, но значительно отличаются от свойств базовой схемы симметричного торможения. Лишь в случае пренебрежения направленностью торможения при двустороннем питании внутреннего КЗ с равными токами сторон этот способ формирования тормозного сигнала обеспечивает такую же чувствительность, как способ формирования из выпрямленных токов плеч (при условии, что уровень отстроенности от тока небаланса при обоих способах одинаковый). В самом деле, в режимах внешних КЗ при отсутствии насыщения ТТ практически выполняется равенство $I_1 = I_2 = I_K$ в соответствии с формулой (18) $I_T = I_K$. Следовательно, в режиме внутреннего КЗ при величинах $I_1 = I_2 = 0,5I_K$ и $I_T = 0,5I_K$, т. е. тормозной ток в режиме внешнего КЗ вдвое больше, чем токи плеч в режиме внутреннего КЗ. Для облегчения отстройки от максимальных токов небаланса, вызванных глубокими насыщениями ТТ в переходных процессах, в рассматриваемой ДЗТ предусмотрено блокирование ее в таких режимах (будет рассмотрено позже).

Таким образом, в установившихся режимах КЗ ДЗТ, использующая принцип направленного торможения [в соответствии с формулой (18)], имеет преимущество по чувствительности перед ДЗТ с формированием тормозного сигнала по закономерности, описываемой выражением (16). Однако, поскольку входными токами ДЗТ с направленным торможением являются токи, формируемые фильтрами основной гармоники, часть информации, содержащейся в мгновенных значениях входных сигналов, теряется, что приводит к потере информации о качественных признаках режима. Поэтому время срабатывания такой защиты превышает 20 мс.

5. ТОКИ НЕБАЛАНСА В ПЕРЕХОДНОМ ПРОЦЕССЕ И СПОСОБЫ ОТСТРОЙКИ ОТ НИХ

5.1. ФОРМИРОВАНИЕ ТОКА НЕБАЛАНСА

Важной особенностью режима КЗ является его внезапность, которая создает возможность возникновения апериодической составляющей в токе КЗ. При наличии апериодической составляющей в первичном токе ТТ с кратностью относительно его номинального значения, соизмеримой с предельной кратностью, неизбежно насыщение сердечника уже в первом периоде переходного процесса (ПП), особенно если полярность остаточного потока в сердечнике совпадает с полярностью апериодической составляющей [3]. При этом приведенное к числу витков первичной обмотки ТТ значение намагничивающего тока достигает максимального мгновенного значения тока КЗ. Вместе с тем в режиме внешнего КЗ в таких условиях может оказаться только один из ТТ какой-либо из фаз ДЗТ (например, ТТ поврежденной ветви). ТТ в других плечах (например, питающих ветвей) при этом могут обтекаться меньшими токами КЗ, иметь меньшую нагрузку, чем насытившийся ТТ, или иметь остаточные потоки с полярностью, противоположной по отношению к полярности апериодической составляющей. Таким образом, эти ТТ могут не насытиться в рассматриваемом ПП или насытиться значительно позже, чем ТТ, насытившийся первым. Следовательно, их намагничивающие токи в течение значительной части ПП (или на всем интервале времени ПП) пренебрежительно малы. Если учесть, что одним из основных свойств ДЗ является следующая закономерность образования тока небаланса: ток небаланса есть алгебраическая сумма мгновенных значений намагничивающих токов ТТ, то ток небаланса в рассматриваемом ПП станет практически равен току КЗ (в приведенных значениях к числу витков первичной обмотки ТТ) до тех пор, пока не насытятся другие ТТ, например, питающих ветвей (или в течение всего времени ПП, если другие ТТ не насытятся). На рис. 7 сплошной линией очерчена осциллограмма тока небаланса в ПП внешнего КЗ дифференциальной защиты двухконцевого объекта, в котором время насыщения первого ТТ в начале ПП $t_{Sk}^{(1)}$, второго ТТ $t_{Sj}^{(1)}$, причем $t_{Sk}^{(2)}$, $t_{Sk}^{(3)}$ – время насыщения первого ТТ во втором и третьем

периодах соответственно. Как следует из осциллограммы, на интервале времени $t_{Sk}^{(1)} - t_{Sj}^{(1)}$ ток небаланса отличается от первичного тока КЗ лишь в течение коротких промежутков времени, когда все ТТ не насыщены [3].

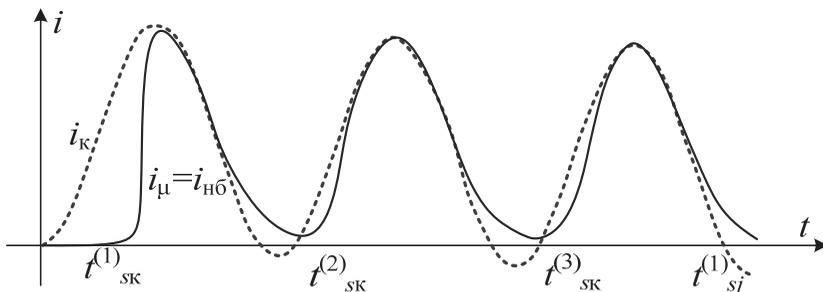


Рис. 7. Осциллограмма токов КЗ и небаланса в переходном процессе

Таким образом, максимальное значение тока небаланса в ПП может практически не отличаться от тока КЗ (в приведенных значениях), достигая максимального мгновенного значения тока КЗ и существовать дольше времени срабатывания ДЗ. Физической причиной существования такого тока небаланса является одновременность насыщения ТТ одноименных фаз ДЗ. Основные условия его возникновения при внешнем КЗ состоят в содержании значительной апериодической составляющей в первичном токе и в существовании остаточных потоков противоположной полярности в сердечниках ТТ одноименных фаз поврежденной и питающих ветвей. Появлению значительного тока небаланса в переходном процессе способствует также существенное превышение сопротивления плеча и величины тока поврежденной ветви над соответствующими параметрами питающих ветвей. После насыщения всех ТТ в переходном процессе ток небаланса значительно уменьшается и его величина становится соизмеримой с величиной тока небаланса установившегося процесса.

Из сказанного следует, что отстроиться от максимальных токов небаланса переходного процесса теми же методами, что и от установившихся процессов, невозможно, так как различие по модулю между током небаланса в дифференциальной цепи и полезным сигналом в режиме внутреннего КЗ практически отсутствует. Это относится и к принципу торможения токами плеч, поскольку в момент возникнове-

ния максимального тока небаланса в ПП ток, по меньшей мере, одного из плеч может снижаться практически до нуля [3]. Поэтому для отстройки от тока небаланса переходного процесса необходимы другие методы.

5.2. ПРИЗНАКИ РЕЖИМА ВНЕШНЕГО КЗ В ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ

Осциллограмма максимального тока небаланса в подавляющем большинстве переходных процессов внешних КЗ имеет вид последовательности однополярных импульсов, разделенных паузами (см. рис. 7). Такой характер тока небаланса вполне закономерен, поскольку этот ток образован намагничивающим током ТТ, который глубоко насыщен благодаря наличию апериодической составляющей в первичном токе. Апериодическая составляющая имеет экспоненциальный характер и поэтому однополярна, что и обуславливает однополярность импульсов переходного тока небаланса. Паузы между импульсами тока возникают из-за изменения полярности первичного тока в окрестностях конца каждого периода ПП (относительно полярности апериодической составляющей), что приводит к выходу из насыщения ТТ и, следовательно, к снижению его намагничивающего тока до пренебрежимо малой величины. Запаздывание появления очередного импульса относительно начала полуволны первичного тока такой же полярности, как и у апериодической составляющей, обусловлено необходимостью определенного времени для нарастания потока в сердечнике до порога насыщения в данном периоде ПП (после каждого выхода из насыщения) [3].

При внутреннем КЗ, не сопровождающемся насыщением ТТ, в дифференциальной цепи протекает либо синусоидальный, либо синусоидальный с апериодической составляющей ток. При насыщении ТТ в этом режиме за счет апериодической составляющей форма дифференциального тока также существенно искажается (см. сплошную линию на рис. 8), но осциллограмма этого тока существенно отличается от показанной на рис. 7.

Таким образом, характеры осциллограмм тока небаланса в ПП (т. е. ложного сигнала) и дифференциального тока в режиме внутреннего КЗ (полезного сигнала) принципиально отличаются друг от друга. Это отличие предоставляет принципиально иную возможность отстройки от тока небаланса по сравнению со способами, рассмотренными в разделе 4. Если найти устойчивый признак возникновения тока небаланса,

порожденного насыщением ТТ в переходном процессе, то по этому признаку можно идентифицировать режим внешнего КЗ и воздействовать на реагирующий орган ДЗ таким образом, чтобы она не могла сработать.

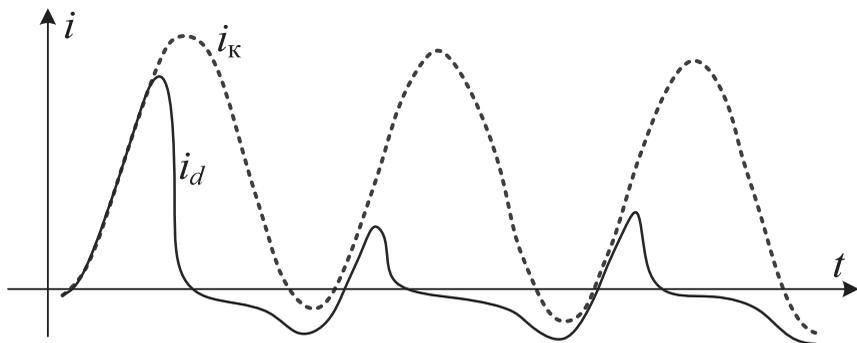


Рис. 8. Оциллограмма тока КЗ i_k и дифференциального тока i_d в переходном процессе

Существует несколько признаков тока небаланса в ПП, сопровождающегося насыщением ТТ. Эти признаки различаются по своим свойствам. Часть признаков проявляется как в токах небаланса в ПП, так и в режимах внутренних КЗ, но в последних режимах в меньшей степени, чем в первых (или в течение меньшего интервала времени). Такие признаки условимся называть количественными. Они, как правило, проявляются на значительных интервалах времени переходных процессов. Другая часть признаков, называемых качественными, проявляется в режимах внешних КЗ и не проявляется в режимах внутренних КЗ, но на незначительных интервалах времени (доли периода, т. е. в течение нескольких миллисекунд). Однако интенсивность проявления этих признаков на разных стадиях ПП, а также при различных условиях возникновения ПП может быть различной. Поэтому устойчивыми признаками тока небаланса (т. е. режима внешнего КЗ) являются только такие признаки, которые позволяют уверенно идентифицировать режимы внешнего или внутреннего КЗ.

Сначала необходимо рассмотреть наиболее широко используемые количественные признаки внешнего КЗ и условия их устойчивости.

Наиболее очевидным признаком максимального тока небаланса в ПП, сопровождающемся значительной аperiodической составляющей

тока КЗ, является его однополярность (см. рис. 7), что существенно отличает его по форме от дифференциального тока в режиме внутреннего КЗ (см. рис. 8). Однако далеко не во всех реально возможных условиях эксплуатации ДЗ этот признак достаточно устойчив. Во-первых, при внутренних КЗ на защищаемом объекте, непосредственно присоединенном к мощному источнику питания, может возникнуть ток с максимальной апериодической составляющей при постоянной времени $0,3 \dots 0,5$ с, а амплитуда периодической составляющей этого тока в течение нескольких периодов может уменьшаться [5]. Тогда осциллограмма тока КЗ имеет практически однополярный характер, поскольку амплитуда непродолжительных полуволн (т. е. полуволн, имеющих противоположную полярность по отношению к полярности апериодической составляющей) исчезающе мала. Если таким первичным током обтекается ТТ с незначительной нагрузкой, то этот ТТ может не насыщаться в продолжение нескольких периодов, и полезный сигнал (ток в дифференциальной цепи при внутреннем КЗ) приобретет почти однополярный характер. Из-за этого по признаку однополярности ДЗ идентифицирует режим внутреннего КЗ как режим внешнего КЗ и не срабатывает до тех пор, пока ток в ее реагирующем органе не становится разнополярным, т. е. пока не возрастет существенно амплитуда непродолжительных полуволн. Таким образом, возможна задержка в срабатывании, соизмеримая с постоянной времени апериодической составляющей. Следует отметить, что при значительной нагрузке ТТ, обтекаемого током КЗ такого характера в рассматриваемом режиме, также возможна задержка в срабатывании, поскольку реагирующий орган может не успеть сработать до первого насыщения ТТ (см. рис. 8). При столь малой амплитуде непродолжительных полуволн их площадь, определяющая значение вторичного тока ТТ в очередном периоде [3], может быть ничтожно мала и соответственно интенсивность полезного сигнала недостаточна для срабатывания реагирующего органа.

Неустойчивость этого признака может проявляться и в режимах внешних КЗ, особенно при двустороннем питании внешнего КЗ (рис. 9, а). Если в доаварийном режиме существовал значительный переток активной мощности от источника питания ветви 1 к ветви 2 (или наоборот), то векторы токов от этих источников могут существенно не совпадать по фазе, например, $\arg(I_1) > \arg(I_2)$ (рис. 9, б). Тогда вполне возможно, что КЗ может произойти в такой момент, при котором максимальная апериодическая составляющая возникает в ветви

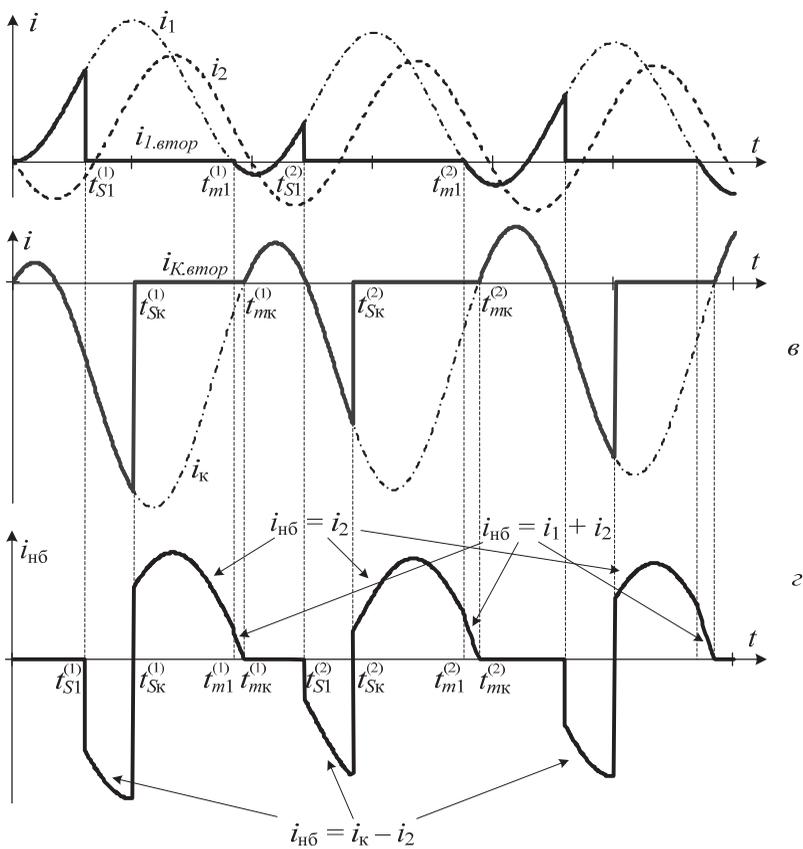
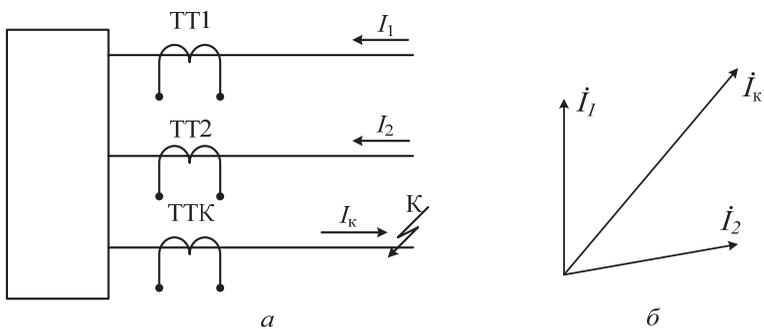


Рис. 9. Пример формирования разнополярного тока небаланса

с опережающим током (I_1 на рис. 9, а). Поскольку $\arg(I_1) > \arg(I_k)$, ток i_k в поврежденной ветви начнется с непродолжительной полуволны (рис. 9, в), и поэтому в начале ПП поток в сердечнике ТТк изменится в сторону удаления от насыщения. И только с момента начала продолжительной полуволны приращение потока происходит в направлении насыщения сердечника. По этим причинам, а также из-за возможного различия нагрузок и остаточных потоков в сердечниках ТТ1 и ТТк первый из них может насытиться значительно раньше, чем второй. Аналогично ТТ1 выходит из насыщения раньше, чем ТТк, так как продолжительная полуволна тока i_1 оканчивается раньше, чем у тока i_k . Поэтому эти ТТ насыщаются и выходят из насыщения поочередно: при $t = t_{S1}^{(1)}$ насыщается ТТ1 (рис. 9, в) и лишь при $t = t_{Sk}^{(1)}$ – ТТк, т. е. на интервале $t_{S1}^{(1)} - t_{Sk}^{(1)}$ в состоянии насыщения находится только ТТ1, а его вторичный ток равен нулю. Затем на интервале $t_{Sk}^{(1)} - t_{m1}^{(1)}$ насыщены оба ТТ и по дифференциальной цепи протекает только ток i_2 . При $t = t_{m1}^{(1)}$ выходит из насыщения ТТ1, при $t = t_{mk}^{(1)}$ выходит из насыщения ТТк (на интервале $t_{m1}^{(1)} - t_{mk}^{(1)}$ остается насыщенным лишь ТТК). В последующих периодах очередность насыщения и выхода из насыщения, а также следование интервалов времени, в которых насыщены один или оба ТТ, сохраняются до тех пор, пока не насытятся другие ТТ. Таким образом, вследствие поочередного преобладания намагничивающих токов насыщенных ТТ (то ТТ1, то ТТК) образуется разнополярный ток небаланса, модуль которого соизмерим с модулем максимального тока небаланса в ПП, хотя и меньше его. На рис. 9 осциллограммы построены на основе ПХН-аппроксимации характеристики намагничивания ТТ [3]: когда насыщен только ТТ1, его вторичный ток отсутствует и ток небаланса равен $i_k - i_2$, когда насыщены ТТ1 и ТТк – i_2 , когда насыщен только ТТк – $i_1 + i_2$.

Возможность возникновения разнополярного тока небаланса в рассматриваемом режиме можно доказать и без построения осциллограммы. Действительно, ток небаланса образуется алгебраическим суммированием мгновенных значений намагничивающих токов, которые при глубоко насыщенных ТТ практически не отличаются от их первичных токов. Но векторы первичных токов ТТК и ТТ1 почти взаимно проти-

воположны, т. е. их мгновенные значения имеют противоположную полярность на протяжении большей части их полуволн. Поэтому, если насыщен один из этих ТТ, полярность тока небаланса определяется полярностью насыщенного ТТ, а так как они насыщаются поочередно, полярность искомого тока меняется. Когда насыщены оба ТТ, ток небаланса есть алгебраическая сумма мгновенных значений намагничивающих токов этих ТТ, которая также может изменять полярность, поскольку векторы первичных токов этих ТТ смещены относительно положения противофазы (рис. 9, б).

Другим распространенным признаком тока небаланса в ПП (и соответственно режима внешнего КЗ) является большее содержание четных гармоник (особенно, второй) в токе небаланса, чем в дифференциальном токе при внутренних КЗ. Физической причиной проявления этого признака служит также одностороннее насыщение ТТ в переходном процессе и, следовательно, однополярный характер намагничивающего тока. В результате этого полуволны противоположной полярности периодической составляющей тока небаланса в ПП не могут быть симметричными. Однако и в ПП режима внутреннего КЗ, сопровождающемся глубоким насыщением ТТ, дифференциальный ток тоже содержит четные гармоники (см. рис. 8) в достаточно большом количестве. Как показали исследования, не существует достаточно четкого количественного различия содержания четных гармоник в дифференциальных токах обоих рассматриваемых режимов при глубоких насыщениях ТТ. Такое различие появляется, если в режимах внутренних КЗ отсутствует апериодическая составляющая, вызывающая глубокое насыщение ТТ. Поэтому при использовании этого признака в случаях глубоких насыщений ТТ в режимах внутренних КЗ возникают задержки в срабатывании ДЗ: в начале ПП по рассматриваемому признаку она ложно идентифицирует режим внешнего КЗ, и лишь на последующей стадии ПП, когда степень насыщения ТТ снижается, происходит выявление внутреннего КЗ. Некоторого уменьшения задержек в срабатывании можно достичь, если в качестве признака тока небаланса использовать отношение амплитуд второй и первой гармоник и дифференциального тока.

Количественным признаком тока небаланса в ПП с глубоким насыщением ТТ является также наличие пауз между импульсами (полуволнами) этого тока на тех интервалах времени, когда ТТ выходит из насыщения. При неглубоких насыщениях такие паузы в явном виде отсутствуют, но на интервале выхода из насыщения мгновенное значение тока небаланса изменяется гораздо медленнее (на один-два поряд-

ка), чем на интервале насыщенного состояния. Поэтому эти паузы достаточно точно проявляются в первой производной тока небаланса. Однако устойчивость этого признака может нарушаться в режимах как внешнего, так и внутреннего КЗ. При внешних КЗ объекта дифференциальной защиты, непосредственно примыкающего к мощному источнику питания, непродолжительная полуволна может быть весьма малой, если в токе содержится аperiodическая составляющая, начальное значение которой близко к максимальному. Поэтому насытившийся в начале переходного процесса ТТ выходит из насыщения на весьма короткое время [3], и, следовательно, длительность пауз оказывается незначительной. Кроме того, в режимах внешних КЗ с двусторонним питанием при наличии значительного взаимного угла между ЭДС источников питания и максимальной аperiodической составляющей в токе питающей ветви (см. рис. 9) паузы могут существенно сокращаться за счет разновременности насыщений и выходов из насыщений ТТ питающей и поврежденной ветви (см. рис. 9, з). Если взаимный угол между векторами ЭДС отсутствует, наиболее вероятно насыщение ТТк, и тогда длительность паузы при максимальном содержании аperiodической составляющей может быть большой ($t_{нк0}^{(1)} = t_{mk}^{(1)} - t_{ск}^{(2)}$ на рис. 9, з). Но если существует значительный взаимный угол, а максимальная аperiodическая составляющая возникла в ветви с опережающей ЭДС, то $t_{нк1}^{(1)} = t_{mk}^{(1)} - t_{s1}^{(2)}$, т. е. в результате насыщения ТТ1 пауза уменьшилась на длительность интервала $t_{m1}^{(2)} - t_{mk}^{(2)}$. В режимах внутренних КЗ, сопровождающихся аperiodической составляющей и насыщением ТТ, также возникает пауза во вторичном токе (а следовательно, и в дифференциальном токе), которая может существенно превышать паузу в токе небаланса. По мере затухания аperiodической составляющей эта пауза уменьшается и становится меньше, чем в токе небаланса, т. е. ДЗ срабатывает с задержкой, соизмеримой с постоянной времени аperiodической составляющей. Следует отметить, что в ДЗ некоторых объектов первичный ток в режиме внутреннего КЗ может значительно превышать расчетное значение тока, по которому выбирается ТТ и его нагрузка (например, в случае ДЗ трансформаторов). В таких случаях при внутренних КЗ насыщение ТТ может возникнуть и при отсутствии аperiodической составляющей [3]. Поэтому КЗ сопровождается паузами значительной продолжительности, которые не уменьшаются с течением времени. Это означает, что ДЗ, использующая рассматриваем-

мый признак, в таком случае может отказать в действии. Чтобы этого не происходило, она должна снабжаться дополнительными средствами защиты (обычно – дифференциальной отсечкой).

В целом все количественные признаки тока небаланса (режима внешнего КЗ) обладают следующим общим недостатком: для идентификации режима им требуется время не менее периода промышленной частоты. При внутренних КЗ, сопровождающихся аperiodической составляющей, насыщение ТТ может происходить гораздо раньше, и тогда в полезном сигнале (в дифференциальном токе) может появиться признак режима внешнего КЗ. А признак внутреннего КЗ появляется после некоторого затухания аperiodической составляющей, когда насыщение ТТ становится не столь глубоким, как в начальной стадии ПП, что и обуславливает задержку в срабатывании ДЗ. Таким образом, отстройка от внешних КЗ достигается за счет задержек в срабатывании ДЗ в режимах внутренних КЗ, сопровождающихся значительной аperiodической составляющей и насыщением ТТ.

Качественные признаки режима внешнего КЗ являются непосредственным следствием характера токов в нагруженных преимущественно активными сопротивлениями плеч ТТ, насытившихся под влиянием аperiodической составляющей тока КЗ. Наиболее простым качественным признаком внешнего КЗ является *совпадение передних фронтов продолжительных полуволн тока плеча поврежденной ветви и суммы токов плеч питающих ветвей (если принять в качестве положительного направление токов при внешнем КЗ) на том интервале времени, при котором ни один из ТТ не насыщен*. Именно в этом интервале каждый ТТ работает в режиме источника тока (так называемый «интервал идеальной трансформации»), и токи плеч в режиме внешнего КЗ находятся в соотношении, определяемом первым законом Кирхгофа. Рассматриваемый признак безусловно устойчив до первого насыщения ТТ, причем погрешность ТТ на этом интервале весьма мала (значительно меньше 10 %). Однако при неглубоком насыщении в последующих периодах интервалы идеальной трансформации отсутствуют и признак становится неустойчивым. Это объясняется наличием достаточно больших приращений потока в сердечнике насыщенного ТТ и, следовательно, существованием его ЭДС, которая способна существенно влиять на величину и характер вторичного тока (при глубоких насыщениях эта ЭДС ничтожно мала, и ей всегда пренебрегают, используя прямоугольную аппроксимацию характеристики намагничивания [3]). При глубоких насыщениях устойчивость рассматриваемого

признака может сохраняться в течение нескольких периодов, но не до конца ПП вследствие постепенного затухания аperiodической составляющей, приводящего к уменьшению степени насыщений сердечника. Поскольку при внешних КЗ могут быть как глубокие, так и неглубокие насыщения, этот признак следует считать устойчивым только в первом периоде ПП.

Более совершенным является качественный признак, который формируется на основе контроля передних фронтов положительных полуволн не только токов плеч, но и дифференциального тока. *Признаком режима внешнего КЗ (т. е. тока небаланса) в ПП является запаздывание переднего фронта появления тока небаланса относительно совпадения передних фронтов токов плеча поврежденной ветви и суммы токов плеч питающих ветвей (если принять в качестве положительного направление токов при внешнем КЗ).* Это запаздывание закономерно, так как ток небаланса в ПП появляется в результате насыщения ТТ, а магнитный поток не может нарастать скачкообразно. Для его возрастания до потока насыщения необходимо определенное время, которое и есть время запаздывания тока небаланса. Однако и этот признак устойчив только в первом периоде ПП, так как в последующих периодах его устойчивость нарушается по тем же причинам, что и устойчивость предыдущего признака, или в результате взаимодействия с ТТ других фаз.

Еще один качественный признак режима, основанный на характере изменения мгновенных значений токов небаланса и дифференциального в режиме внутреннего КЗ, использует временные параметры этих изменений. *Для тока небаланса в ПП (см. рис. 7) характерно превышение интервала времени от момента его максимального мгновенного значения до конца его полуволны; для полезного сигнала (см. рис. 8), наоборот, превышение интервала от начала полуволны до максимума, если ТТ насыщен, и равенство этих интервалов, если не насыщен.* Недостатком этого признака является сравнительно большое время его проявления – не менее 20 мс. Он может быть неустойчивым в последующих (после первого) насыщениях ТТ под влиянием взаимодействия ТТ разных фаз.

Признаком тока небаланса в ПП является также совпадение приращений: с одной стороны, отрицательного – суммы модулей токов плеч и, с другой стороны, положительного – модуля дифференциального тока. Это происходит потому, что ток небаланса в ПП возникает за счет резкого уменьшения тока плеча насыщенного ТТ. В режиме

внутреннего КЗ знаки приращений этих токов совпадают, так как дифференциальный ток образуется из токов плеч, как и тормозной ток. Этот признак может использоваться в защите тех объектов, у которых единственной причиной возникновения тока небаланса служит различие намагничивающих токов ТТ, поскольку компоненты тока небаланса, обусловленные другими причинами, увеличиваются вместе с ростом токов плеч, т. е. знаки приращений токов тормозного и дифференциального совпадают, как и при внутренних КЗ. Кроме того, этот признак может терять устойчивость при тех же условиях, что и предыдущий. Он также не является быстродействующим, поскольку работает с модулями токов, а не с мгновенными значениями. Но модуль тока при наличии апериодической составляющей в худшем случае определяется примерно за 20 мс. Однако ТТ может насытиться значительно раньше, что будет причиной неустойчивости этого признака.

Главные достоинства рассмотренных качественных признаков – это, во-первых, возможность использования для идентификации режимов неискаженной информации о защищаемом объекте, а во-вторых, возможность идентификации режима до насыщения ТТ. Вместе с тем отсутствует повторяемость его проявления при последующих насыщениях ТТ, что является недостатком этих качественных признаков.

6. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОТСТРОЙКИ ОТ ТОКОВ НЕБАЛАНСА В ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ

Здесь рассмотрены только наиболее распространенные технические средства нейтрализации токов небаланса в ПП, так как существует множество предложений по созданию таких средств, которые не нашли широкого применения. В настоящее время широко используется торможение второй гармоникой дифференциального тока, сочетание торможения с активным добавочным сопротивлением в дифференциальной цепи, насыщающиеся ТТ и в какой-то мере качественные признаки внешнего и внутреннего КЗ.

Наиболее простым по принципу действия является первое из упомянутых средств. Для его реализации достаточно иметь фильтр второй гармоники дифференциального тока и выпрямитель. Выделенная вторая гармоника дифференциального тока используется в качестве тор-

мого сигнала в реагирующем органе ДЗ. Недостатки такого устройства описаны в разделе 5.2. Устойчивость этого признака повышается, если торможение осуществляется в зависимости от величины отношения модулей второй и первой гармоник и дифференциального тока. Поэтому в современных микропроцессорных ДЗТ, использующих этот признак, предусмотрено выделение не только второй, но и первой гармоники дифференциального тока.

Достаточно простым средством отстройки от токов небаланса переходного процесса по признаку однополярности является сочетание выпрямления дифференциального тока с измерением частоты его импульсов. Максимальный ток небаланса в ПП (однополярного характера) содержит один импульс в периоде промышленной частоты, а разнополярный дифференциальный ток в режиме внутреннего КЗ – два импульса. Соответственно частота этих импульсов при внешних КЗ равна 50 Гц, а при внутренних КЗ – 100 Гц. Однако этот метод обладает всеми недостатками, присущими признаку однополярности тока небаланса (см. раздел 5.2).

К простым по принципу действия средствам можно отнести также использование признака паузы между импульсами тока небаланса. Как отмечено в разделе 5.2, для повышения его устойчивости следует контролировать паузу между первыми производными этих импульсов. Поэтому такое устройство содержит дифференциатор, выпрямитель и орган контроля времени. В дифференциальной защите трансформаторов, кроме этого, необходима дифференциальная отсечка. В разделе 5.2 дана оценка устойчивости функционирования этого устройства.

Качественные признаки режимов в настоящее время используются в очень ограниченном объеме, но в научно-технической литературе и технической документации фирм-изготовителей, как правило, нет информации ни о виде используемых признаков, ни о структуре и принципе действия самих устройств.

6.1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКТИВНОГО ДОБАВОЧНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЦЕПИ

Механизмы влияния активного добавочного сопротивления на ток небаланса в переходном и в установившемся процессе принципиально различны. При глубоком насыщении ТТ его ЭДС пренебрежимо мала и плечо этого ТТ становится практически пассивным, т. е. ветвью,

параллельной дифференциальной цепи. На рис. 10 показана расчетная схема токовых цепей ДЗ с добавочным сопротивлением в дифференциальной цепи R_d . В режиме внешнего КЗ в точке К после насыщения ТТК токи плеч питающих ветвей в узле a образуют ток $\sum_j i_{vj} \cong i'_k$, где i'_k – ток КЗ, приведенный к числу витков вторичной обмотки ТТ. Этот ток распределяется на две параллельные ветви: дифференциальную и плечо ТТк обратно пропорционально сопротивлениям R_d и R_k . Поэтому ток небаланса уменьшается до величины

$$i_{\text{нб}} = \frac{i'_k R_k}{R_k + R_d}. \quad (19)$$

При этом появляется ток в плече насыщенного ТТК (так называемый «помогающий эффект»)

$$i_{\text{пк}} = \frac{i'_k R_d}{R_k + R_d}. \quad (20)$$

Это очень важно, поскольку создает возможность для эффективного применения принципа торможения в ПП, сопровождающихся насыщением ТТ, когда при отсутствии добавочного сопротивления ток в плече ТТк может исчезать практически полностью. Таким образом, использование активного добавочного сопротивления в дифференциальной цепи ДЗТ повышает степень отстроенности от внешних КЗ с насыщением ТТ как за счет уменьшения тока небаланса, так и посредством эффективного торможения. Однако значительное превышение величины этого сопротивления над сопротивлениями плеч может обусловить существенные задержки в срабатывании ДЗТ в режиме внутреннего КЗ (особенно при двустороннем питании, когда по добавочному сопротивлению протекает сумма токов плеч). Это объясняется не только перегрузкой ТТ питающих ветвей за счет добавочного сопротивления, но и возможностью насыщения ТТ в ветви, не обтекаемой током КЗ, т. е. не имеющей источника питания (например, на рис. 10 источник выведен в ремонт и при КЗ в точке К $i_3 = 0$). В режиме внутреннего КЗ падение напряжения на дифференциальной цепи оказывается значительным, причем оно полностью приложено и к тому ТТ, первичная обмотка которого не обтекается током. Это падение

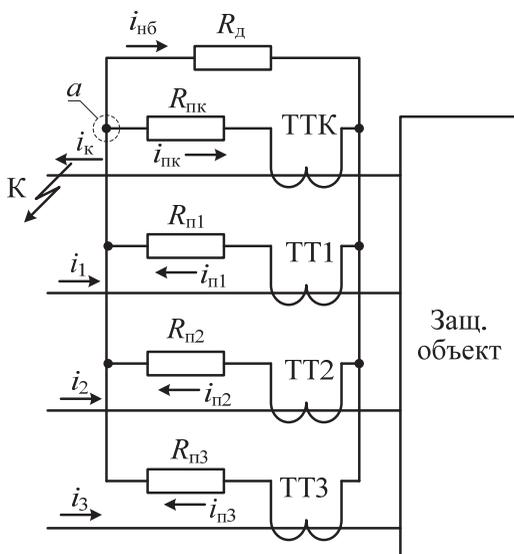


Рис. 10. Расчетная схема токовых цепей ДЗ с добавочным сопротивлением в дифференциальной цепи

напряжения должно быть уравновешено ЭДС этого ТТ, для образования которой требуется существенное приращение потока в его сердечнике. При неблагоприятной полярности остаточного потока это приводит к насыщению рассматриваемого ТТ. Если окажется, что сопротивление его плеча невелико, оно практически полностью зашунтирует дифференциальную цепь на время, в течение которого этот ТТ остается насыщенным. Существуют и другие ограничения максимальной допустимой величины добавочного сопротивления в дифференциальной цепи, описанные в разделе 3.

Кроме того, условием использования добавочного сопротивления является равенство вторичных номинальных токов плеч ДЗТ. Если это условие не выполняется, то добавочное сопротивление обтекается током и при ненасыщенных ТТ во всех режимах, сопровождающихся сквозным током. Падение напряжения на этом сопротивлении увеличивает ЭДС ТТ с наибольшим вторичным номинальным током, который (ТТ) и без того вынужден развивать большую ЭДС, чем при равных токах плеч, чтобы образовать больший ток плеча. Таким образом, оно будет вызывать эффект, обратный тому, который рассмотрен в

разделе 3, и различие величин намагничивающих токов в данной фазе под влиянием добавочного сопротивления ДЗ возрастает. Положение еще более усугубляется, если этот ТТ имеет наибольшую нагрузку и худшую характеристику намагничивания. Чтобы избежать проявлений таких отрицательных эффектов, некоторые фирмы используют ограничители напряжения в дифференциальной цепи или применяют добавочные сопротивления в дифференциальной цепи, образованной промежуточными ТТ, включенными в плечи ДЗТ. Тогда в режиме внутреннего КЗ напряжение на дифференциальной цепи не вызывает перегрузки ТТ питающих ветвей или насыщения ТТ ветви, не обтекаемой током КЗ.

6.2. НАСЫЩАЮЩИЙСЯ ТРАНСФОРМАТОР ТОКА

Насыщающийся ТТ (НТТ) – это ТТ с малым объемом стали, который обладает свойством при протекании по первичной обмотке однополярного тока создавать во вторичной обмотке значительно меньшую ЭДС, чем при протекании разнополярного тока. Именно за счет этого свойства НТТ обеспечивает отстройку реагирующего органа ДЗ, подключенного к вторичной обмотке этого НТТ, от максимальных токов небаланса в ПП. НТТ весьма прост по устройству, но принцип его действия сложнее, чем принципы действия, описанные в разделе 6.1.

Принцип действия НТТ основан на использовании различия особенностей формирования ЭДС при однополярном и разнополярном насыщении его сердечника. На рис. 11 показана схема токовых цепей ДЗ с включенным в дифференциальную цепь реле с НТТ (КАТ – стандартное обозначение реле с НТТ). Поскольку вторичная цепь НТТ (ТЛ – на рис. 11) состоит только из реле КА, условие отстройки от максимального тока небаланса в ПП и срабатывания в режиме внутреннего КЗ реле с НТТ может быть выражено через соотношение вторичных ЭДС НТТ: при максимальном токе небаланса $E_{нб}$ (ложный сигнал), в режиме внутреннего КЗ $E_{кз}$ (полезный сигнал) и $E_{ср}$ (порог срабатывания), соответствующая току срабатывания реле КА:

$$E_{нб} < E_{ср} < E_{кз}, \quad (21)$$

где все ЭДС представлены в действующих значениях, так как в качестве КА используется электромагнитное реле, которое реагирует на действующее значение тока.

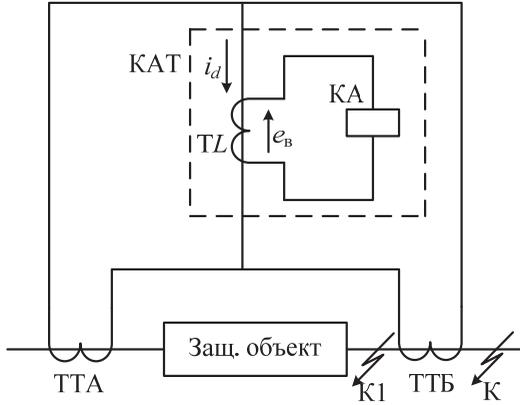


Рис. 11. Схема токовых цепей ДЗ с насыщающимся ТТ

Заметим, что качественная оценка действующего значения ЭДС в нелинейной цепи довольно трудоемка и не может быть представлена достаточно простым математическим выражением. В данном случае не требуется точная количественная оценка процесса, поскольку целью является характеристика принципа действия и качественная оценка основных закономерностей формирования ЭДС, соответствующих соотношению (21). Поэтому допустимо заменить действующие значения ЭДС в условии (21) на выпрямленные средние:

$$E_{\text{нб}}^c < E_{\text{ср}}^c < E_{\text{КЗ}}^c, \quad (22)$$

где каждая из ЭДС определена как

$$E^c = \frac{1}{T} \int_0^T |e| dt, \quad (23)$$

где e – мгновенное значение ЭДС НТТ; T – период промышленной частоты.

Мгновенное значение ЭДС во вторичной обмотке НТТ зависит от ее потокосцепления в соответствии с законом Фарадея:

$$e = -\frac{d\Psi}{dt}.$$

Это выражение можно рассматривать как дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными. Его решение есть

$$\Delta\Psi|_{\Psi_1}^{\Psi_2} = -\int_{t_1}^{t_2} e \cdot dt . \quad (24)$$

На основе уравнения (24) можно заключить, что полярность полуволны ЭДС определяется знаком приращения потокосцепления. Поскольку необходимо определить выпрямленное среднее значение ЭДС, следует выбирать интервалы интегрирования так, чтобы в каждом из них ЭДС имела только одну полярность. Если разделить на такие интервалы полный цикл изменения ЭДС за время, достаточное для срабатывания реагирующего органа, и просуммировать на этом промежутке времени по модулю ее мгновенные значения, то можно заметить, что отрицательное приращение потокосцепления наблюдается в течение положительной полуволны ЭДС, положительное – в течение отрицательной. Время срабатывания реагирующего органа, используемого совместно с НТТ, составляет 20 мс, т. е. один период промышленной частоты. Поэтому можно принять $t_1 = 0$ и $t_2 = T$. Тогда с учетом гистерезиса следует считать, что $\Psi_1 = \Psi_r$, т. е. каждый период начинается при наличии остаточного потока. Если просуммировать арифметически приращения потокосцепления (т. е. по модулю), то правая часть уравнения (24) должна иметь модульное описание:

$$\int_0^T |e| dt = |\Delta\Psi|_{\Psi_r}^{\Psi_T} , \quad (25)$$

где Ψ_r , Ψ_T – потокосцепления: остаточное и в конце периода соответственно.

Подставив (25) в (23), получим следующую зависимость средней выпрямленной величины ЭДС от приращения потокосцепления

$$E^c = \frac{|\Delta\Psi|_{\Psi_r}^{\Psi_T}}{T} . \quad (26)$$

Чтобы обеспечить гарантированную отстройку от токов небаланса, необходимо выбрать такие условия формирования средневыврямленной ЭДС в режимах внешних КЗ, при которых она принимает макси-

мально возможное значение на интервале времени, равном времени срабатывания реагирующего органа. На рис. 12 показана предельная петля гистерезиса, по которой перемагничивается сердечник НТТ дифференциальным током, вызывающим его глубокое насыщение. Ось ординат продлена в отрицательном направлении и использована в качестве оси времени для изображения осциллограмм тока небаланса переходного процесса и установившегося дифференциального тока режима внутреннего КЗ. Время срабатывания реагирующего органа реле с НТТ – 20 мс, что равно периоду промышленной частоты. Чтобы получить максимальное по модулю среднее значение ЭДС за период при протекании по первичной обмотке НТТ однополярного тока небаланса, необходимо в соответствии с (26) обеспечить максимальное приращение потокосцепления. Поэтому при положительной полярности тока небаланса ПП следует принять значение остаточной индукции в начале ПП максимальным и отрицательным. Тогда при изменении мгновенного значения тока небаланса от нуля до максимума (от точки 0 до точки m на рис. 12) потокосцепление изменяется от $-\Psi_{rm}$ до Ψ_S , т. е. $\Delta\Psi = \Psi_{rm} + \Psi_S$. Далее изменение тока небаланса на интервале от m до a вызывает уменьшение потокосцепления от Ψ_S до $+\Psi_{rm}$, т. е. на этом интервале $\Delta\Psi = \Psi_S - \Psi_{rm}$. Таким образом, максимальное средневыпрямленное значение ЭДС НТТ при токе небаланса в ПП

$$E_{\text{нб}}^c = \frac{2\Psi_S}{T}. \quad (27)$$

Следует отметить, что в последующих периодах значение ЭДС НТТ, наведенной током небаланса в ПП, становится приблизительно на порядок меньше, чем выраженное формулой (27). Действительно, во втором периоде (см. рис. 12) при изменении тока небаланса в пределах интервала $0_1 - m_1 - a_1$ потокосцепление изменяется по частной петле гистерезиса, прилегающей к обратной ветви предельной петли, т. е. от $+\Psi_{rm}$ до Ψ_S и от Ψ_S до $+\Psi_{rm}$, а значит,

$$E = \frac{2(\Psi_S - \Psi_{rm})}{T}. \quad (28)$$

Следовательно, если максимальная ЭДС НТТ, образованная протеканием однополярного тока в дифференциальной цепи и определенная по формуле (27), удовлетворяет левой части условия (22), то отстройка от токов небаланса однополярного характера гарантирована.

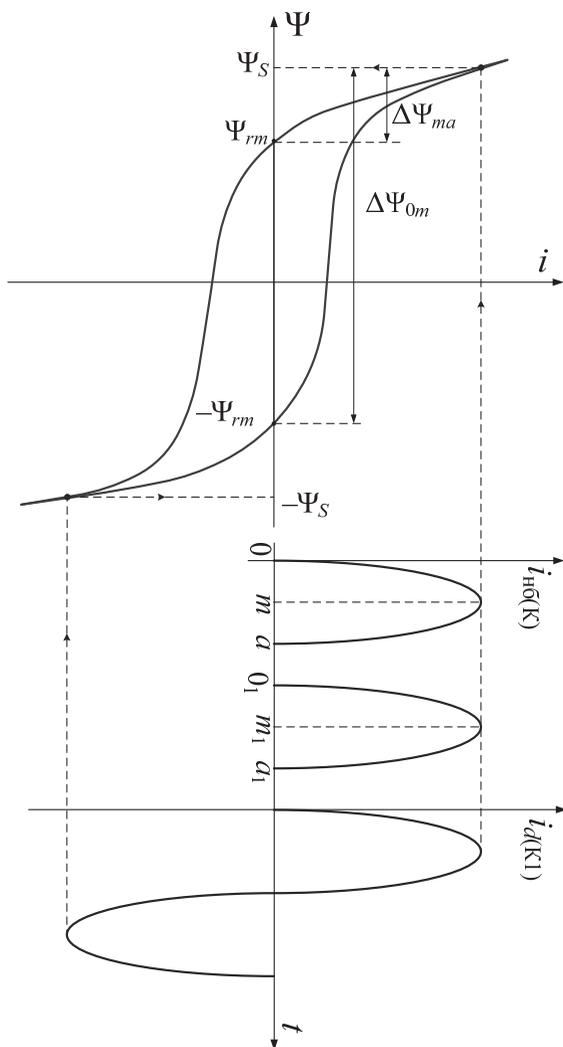


Рис. 12. Пояснения к вопросу о формировании вторичной ЭДС в НТТ

Для успешного выявления внутренних КЗ необходимо, чтобы ЭДС срабатывания, отстроенная от максимальной ЭДС при однополярном токе небаланса, оказалась меньше, чем ЭДС в режиме внутреннего КЗ.

Иными словами, необходимо проверить, выполняется ли правая часть условия (22). Для этого следует рассмотреть режим протекания по дифференциальной цепи синусоидального тока, вызывающего насыщение НТТ (см. рис. 12). Многие внутренние КЗ не содержат значительной аperiodической составляющей, а если и происходит КЗ с максимальной аperiodической составляющей, то она через некоторое время затухает. Перемагничивание сердечника НТТ в таких условиях происходит по предельной петле гистерезиса, но в отличие от ранее рассмотренного процесса за один период – в обеих полярностях: как положительной, так и отрицательной. При этом процесс изменения потокосцепления в каждой из полярностей не может отличаться от процесса в первом периоде режима с однополярным током небаланса, поскольку перемагничивание происходит в обоих случаях по одной и той же предельной петле гистерезиса. Следовательно, в режиме внутреннего КЗ при отсутствии значительной аperiodической составляющей в токе величина ЭДС НТТ

$$E_K^c = \frac{4\Psi_S}{T}, \quad (29)$$

т. е. вдвое больше, чем при максимальном однополярном токе небаланса, и, следовательно, удовлетворяет условию (22).

Основными достоинствами реле с НТТ являются простота и высокая степень отстроенности от токов небаланса однополярного характера. Однако для этого реле характерны все недостатки, свойственные признаку однополярности (см. раздел 5.2), а также незначительное превышение интенсивности входного тока над током срабатывания реагирующего органа НТТ в режиме внутренних КЗ. Это объясняется необходимостью значительного потока в сердечнике (т. е. близкого к потоку насыщения) для создания ЭДС срабатывания, соответствующей условию (22), а значит, неизбежностью насыщения сердечника НТТ в режиме внутреннего КЗ. Поэтому завод-изготовитель гарантирует при коэффициенте чувствительности ДЗ, рассчитанном по первичным токам, равном двум, превышение тока на входе реагирующего органа НТТ над током срабатывания в 1,3 раза, а при равном пяти – в 1,5 раза. Следовательно, даже незначительное нарушение настройки реагирующего органа вызывает резкое изменение свойств реле с НТТ: если это нарушение происходит в сторону увеличения тока срабатывания, реле существенно загрубляется (вплоть до отказа в срабатывании), а если –

в сторону уменьшения, реле может излишне сработать при однополярном токе небаланса (отказ в несрабатывании). Поэтому плавное регулирование тока срабатывания реле с НТТ невозможно, и для таких реле задают МДС срабатывания $F_{\text{ср}}$, а ток срабатывания $I_{\text{ср}}$ регулируют путем изменения чисел витков первичной обмотки НТТ W_d :

$$I_{\text{ср}} = \frac{F_{\text{ср}}}{W_d}.$$

Недостатком реле с НТТ является также существенная задержка в срабатывании при внутренних повреждениях. При этом чем больше постоянная времени системы и выше степень отстройки от апериодической составляющей тока, тем существеннее задержка в срабатывании. Это объясняется тем, что при КЗ с апериодической составляющей первичного тока, достигающей максимального значения, характер тока повреждения близок к однополярному, который плохо трансформируют НТТ. Максимальную задержку в срабатывании реле серий ДЗТ-11 с насыщающимися трансформаторами, обусловленную тормозным эффектом свободной составляющей первичного тока КЗ, в [6] предлагается определять по выражению

$$\Delta t_{\text{ср}} = T_a \ln \left[\frac{k_{\text{ч}} b \sqrt{2}}{k_{\text{ч}} - 1} \right],$$

где T_a – постоянная времени затухания свободной составляющей тока КЗ; $k_{\text{ч}}$ – коэффициент чувствительности, определяемый как кратность вынужденной составляющей тока КЗ по отношению к току срабатывания реле; b – коэффициент, в [6] принимается равным 0,8.

Таким образом, при $k_{\text{ч}} = 2$ максимальная задержка в срабатывании может достигать $0,8T_a$, что, как правило, больше времени насыщения сердечника ТТ апериодической составляющей. Поэтому в первые периоды внутреннего КЗ такая защита замедляется из-за наличия апериодической составляющей в дифференциальном токе, а затем может замедляться из-за малой кратности тока в реле [6].

6.3. ВЛИЯНИЕ ТОРМОЖЕНИЯ ТОКАМИ ПЛЕЧ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ В ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ

В разделе 6.1 показано, что торможение может успешно применяться для отстройки от токов небаланса в режимах ПП, если в дифференциальной цепи имеется активное добавочное сопротивление. Однако условием его применения является равенство вторичных номинальных токов плеч, чего нередко весьма трудно достичь (например, в ДЗТ трансформаторов (АТ), ошиновок и др.). Поэтому в подавляющем большинстве ДЗТ добавочные сопротивления в дифференциальной цепи не используются. Реакция ДЗТ на насыщение ТТ в этих случаях существенно зависит от схемы торможения и от способа формирования тормозного тока из токов плеч, так как насыщение непосредственно влияет на ток плеча.

Из описания ПП в цепях ДЗ, представленного в разделе 5, следует, что условия функционирования ДЗТ в таких режимах существенно осложнены. Во-первых, ТТ может насытиться в первом периоде ПП за 4...7 мс и информация о токе защищаемого объекта со стороны плеча насыщенного ТТ практически прекратится или полностью исказится за счет подпитки от ТТ соседних фаз. Во-вторых, в последующих периодах ПП по величине мгновенного значения тока плеча в течение времени, соизмеримого с постоянной времени апериодической составляющей, невозможно судить о состоянии защищаемого объекта. Более того, такая возможность в общем случае отсутствует и при выделении основной гармоники тока плеча, так как он практически полностью состоит из токов соседних фаз. Следовательно, при использовании искаженных насыщением ТТ токов для идентификации режима внутреннего КЗ возможна длительная задержка срабатывания ДЗТ, а при внешних КЗ – ее излишнее срабатывание. Поэтому ДЗТ объектов, КЗ в которых создает угрозу для динамической устойчивости ЭЭС, должны быть способны идентифицировать режим до первого насыщения ТТ, хотя для обеспечения устойчивости ЭЭС столь малое время срабатывания (4...7 мс) и не требуется. Из этого следует, что время срабатывания реагирующего органа ДЗТ может быть больше времени идентификации режима (при условии запоминания результата идентификации), но, как правило, не более 20 мс.

При несимметричной схеме торможения насыщение ТТ в режимах внешних КЗ в значительной степени снижает тормозной ток как раз в тех интервалах времени, в которых возникает ток небаланса ПП. Следовательно, излишнее срабатывание ДЗТ при насыщении ТТ, вторичный ток которого является тормозным, неизбежно, если не предусмотреть дополнительных мер повышения устойчивости ее функционирования. В режиме внутреннего КЗ, сопровождающегося насыщением ТТ, происходит задержка в срабатывании защиты.

Поведение ДЗТ с симметричной схемой торможения в ПП с насыщением ТТ в значительной степени зависит от способа формирования тормозного сигнала.

Если в ДЗТ с симметричной схемой торможения тормозной ток формируется из суммы выпрямленных токов плеч, то насыщение ТТ в режиме внешнего КЗ тоже вызывает снижение тормозного тока. Но это снижение происходит в значительно меньшей степени, чем в несимметричной схеме, так как при максимальном токе небаланса уменьшается ток только в одном плече (если же насыщаются ТТ и со стороны питания, то ток небаланса значительно меньше максимального). В алгоритме функционирования может быть предусмотрено *запоминание тормозного тока первого периода ПП*, так как ток плеча глубоко насытившегося ТТ в первом периоде значительно больше, чем в периодах, следующих за периодом первоначального насыщения. Таким способом можно обеспечить отстройку от подавляющего большинства внешних КЗ, сопровождающихся насыщением ТТ. В режиме внутреннего КЗ в соответствии со свойствами симметричной схемы торможения тормозной ток снижается приблизительно в 2 раза по сравнению с режимом внешнего КЗ (при равенстве первичных токов в обоих режимах и питании точки КЗ с одной стороны). Поэтому при насыщении ТТ тормозные токи в режиме внутреннего КЗ существенно уменьшаются. Следовательно, в большинстве случаев при дву- или многостороннем питании внутреннего КЗ задержки в срабатывании отсутствуют, что важно, поскольку именно в таких случаях может возникнуть проблема сохранения динамической устойчивости ЭЭС. Однако при использовании способа запоминания тормозного тока первого периода ПП в случае насыщения ТТ в режиме внутреннего КЗ происходит задержка в срабатывании ДЗТ. Поэтому в рассматриваемой ДЗТ целесообразно применять качественные признаки идентификации режима и в зависимости от результата идентификации управлять тормозным сигналом.

В ДЗТ некоторых объектов (генераторов, трансформаторов, авто-трансформаторов) в настоящее время применяется *направленное торможение*, т. е. тормозной сигнал формируется в соответствии с формулой (18). Направленное торможение дает возможность сохранить преимущества ДЗТ с торможением циркулирующими токами (см. раздел 4.3) посредством учета взаимного угла между векторами токов плеч α . Однако в ПП с насыщением ТТ такая ДЗ может функционировать неустойчиво. Например, в режиме внешнего КЗ с двусторонним питанием и глубоким насыщением ТТ поврежденной ветви, когда ток в ее плече практически исчезает, процедура определения тока I_1 может ошибочно назначить один из токов питающих ветвей, и тогда $\alpha = 0$, т. е. $I_T = 0$.

Поэтому для повышения устойчивости функционирования ДЗТ в ПП с насыщением ТТ принимаются дополнительные меры. Например, с этой целью может быть предусмотрено блокирование ДЗТ при таких сверхтоках внешних КЗ, которые в большинстве случаев приводят к насыщению ТТ (см. ниже). При насыщении ТТ одного из плеч в режиме внешнего КЗ тормозной ток у ДЗТ с направленным торможением снижается в большей степени, чем в защите с формированием этого тока из выпрямленных токов плеч, поскольку тормозной ток формируется из произведения модулей токов плеч. Если ТТ насыщен незначительно, то различие тормозных токов невелико (при равных условиях), чему способствует наличие операции извлечения квадратного корня в алгоритме формирования тормозного тока. Например, при снижении тока одного из плеч из-за насыщения ТТ на 50 % величина тормозного тока рассматриваемого варианта ДЗТ составляет 0,707 от значения при ненасыщенных ТТ, а в варианте с тормозным током, сформированным из выпрямленных токов плеч, – 0,75. Но при глубоких насыщениях ТТ в рассматриваемом варианте тормозной ток может уменьшаться во много раз (практически до нуля), в то время как в сопоставляемом варианте – не более чем вдвое. Кроме того, наличие сомножителя в формуле (22), по меньшей мере, в двух режимах может быть причиной излишних срабатываний рассматриваемой ДЗТ.

1. При глубоком насыщении ТТ фаза первой гармоники вторичного тока (тока плеча) может быть существенно искажена, что непосредственно следует из характера формы его осциллограммы (см. рис. 8, второй и третий периоды ПП, где момент появления амплитудного значения первой гармоники достаточно близок к моменту максимального значения вторичного тока). Поэтому при значительных величинах

постоянной времени аperiodической составляющей в течение времени, превышающего время срабатывания защиты, торможение может практически отсутствовать.

2. В режиме внешнего двухфазного (или двухфазного на землю) КЗ ДЗТ трансформатора (или АТ) со схемой замещения обмоток «треугольник – звезда» может вызвать полное прекращение тормозного тока в случае насыщения одного из ТТ. На рис. 13 сплошными линиями показано распределение токов в цепях ДЗТ в режиме внешнего двухфазного КЗ после глубокого насыщения одного из ТТ1 (фаза А) на стороне высшего напряжения, а пунктирными – до насыщения (со стороны низшего напряжения ТТ2 не насыщаются, а распределение токов после насыщения ТТ1 не изменяется, и оно обозначено сплошными линиями; так же обозначено распределение первичных токов). Как видно из рис. 13, в одном из плеч (фаза С, со стороны ВН) ток приобретает противоположное направление по отношению к току в этом плече до насыщения ТТ1 (фаза А). При этом в противоположном плече той же фазы ток плеча сохраняет прежнее направление. Следовательно, ток небаланса образуется как арифметическая сумма мгновенных значений токов плеч, а в соответствии с алгоритмом формирования тормозного тока тормозной ток равен нулю, поскольку $\cos \alpha < 0$, и рассматриваемая ДЗТ может сработать излишне.

Для улучшения отстройки от токов небаланса ПП некоторые зарубежные фирмы используют в ДЗ с направленным торможением так называемое «динамическое торможение», при котором по признаку значительного отрицательного приращения модуля тормозного тока в несколько раз увеличивается коэффициент торможения. Это позволяет обеспечить достаточное торможение для отстройки от тока небаланса при ослабленном за счет насыщения ТТ тормозном сигнале. Следует, однако, отметить, что при глубоких насыщениях ТТ динамическое торможение не дает ожидаемого эффекта, так как тормозной ток практически отсутствует. Кроме того, фактически динамическое торможение является блокированием (а не торможением) ДЗ на время ПП, так как не существует способа адекватного дозирования увеличения коэффициента торможения.

В режимах внутренних КЗ ДЗТ с направленным торможением при насыщении ТТ в ПП имеет преимущество перед ДЗ с тормозным током, сформированным из выпрямленных токов плеч, особенно при глубоком насыщении. В этом случае величина тока одного из плеч близка к нулю и поэтому тормозной ток практически отсутствует. При неглубоком насыщении это преимущество практически не проявляется.

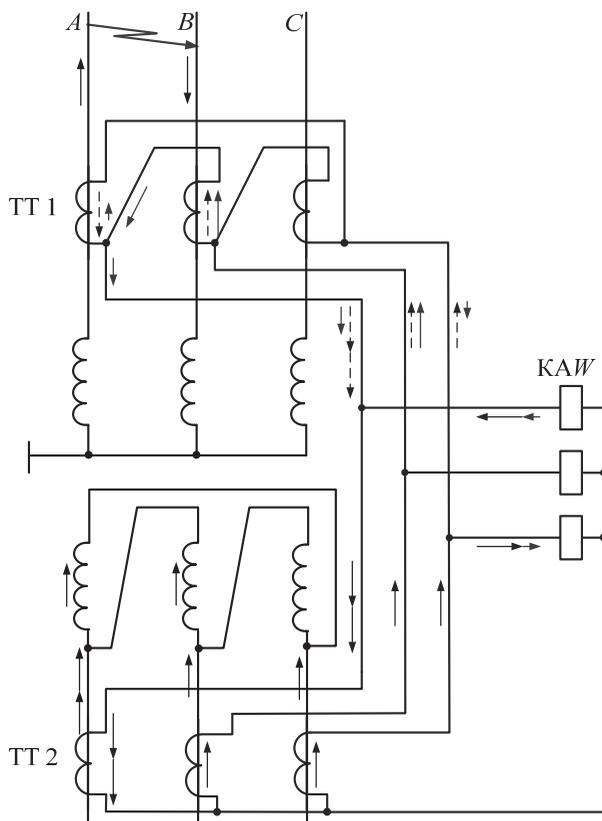


Рис. 13. Распределение токов в цепях ДЗТ в режиме внешнего двухфазного КЗ до и после насыщения одного из ТТ

Для облегчения отстройки от токов небаланса при глубоком насыщении ТТ в ДЗТ с направленным торможением используется ее блокирование (т. е. вывод ДЗТ из работы) при таких сверхтоках. При этом ДЗТ дополняется дифференциальной отсечкой (ДО), которая предназначена для защиты объекта при сверхтоках, когда ДЗТ заблокирована, поскольку не исключено, что блокирование может произойти в режиме внутреннего КЗ. Кроме того, описанный выше ПП, в котором при насыщении ТТ в одном из плеч фаза тока изменяется на противоположную, свойствен только группе ТТ со схемой соединения «тре-

угольник». Поэтому в ДЗТ с направленным торможением фирмы-изготовители рекомендуют использовать на стороне высшего напряжения группу ТТ «звезда», а токи плеч формировать программно. Однако в рассматриваемом случае, когда ТТ1 (фаза *A*) входит в режим глубокого насыщения и работает независимо от других ТТ группы, ток в плече фазы *C* со стороны ВН при программном его вычислении будет равен нулю, что также приводит к обнулению тормозного сигнала и, как следствие, излишней работе защиты.

Следует отметить, что ДО приходится отстраивать от тока небаланса в ПП, так как в отличие от ДЗТ она не имеет средств отстройки от такого тока. Поэтому ток срабатывания ДО весьма велик. При токе внешнего КЗ, равном току срабатывания ДО, ТТ могут достаточно глубоко насыщаться в ПП, что создает опасность излишнего срабатывания ДЗТ. Для уменьшения возможности излишнего срабатывания условия блокирования ДЗТ существенно усложнены следующим образом. В качестве носителя информации о величине тока КЗ используется тормозной ток, порогом блокирования служит параметр *B*. На рис. 5 такой вариант тормозной характеристики обозначен 2б, причем блокирование образует второй излом характеристики: $I_{ти} = B$. Необходимым условием блокирования является превышение величины тормозного тока над значением этого параметра. Кроме того, для блокирования необходимо одновременно выполнять дополнительное условие – превышение значения этого же параметра величинами токов I_1 и I_2 . В режимах внешних КЗ при ненасыщенных ТТ это дополнительное условие выполняется всегда, если выполнено основное условие и при значительных величинах токов ДЗТ блокируется. При насыщении одного из ТТ ток со стороны глубоко насыщенного ТТ I_1 (I_2) может быть меньше порога блокирования и торможение сохраняется.

Таким образом, условие блокирования ДЗТ описывается следующим неравенством:

$$B \leq (I_T, I_1, I_2). \quad (30)$$

Однако из отмеченных выше особенностей условий работы ДЗТ в ПП после глубокого насыщения ТТ в первом периоде следует, что по соотношению тормозного тока и тока, протекающего в дифференциальной цепи, режим внешнего КЗ практически невозможно отличить от режима внутреннего КЗ. Поэтому существует тенденция снижать порог блокирования ДЗТ в расчете на ограничение величины тока

внешнего КЗ таким уровнем, при котором ТТ могут насыщаться в ПП лишь незначительно, что может обеспечить достаточную для отстройки от тока небаланса интенсивность тормозного сигнала. Тем самым допускается разрыв между диапазонами чувствительности ДЗТ и ДО. Это приводит к возможности задержки срабатывания в режиме внутреннего КЗ (с насыщением ТТ), если величина тока КЗ больше параметра B (порога блокирования), но меньше тока срабатывания ДО. Уменьшению вероятности такой задержки способствует также соблюдение условия (30), так как вероятность равенства токов питающих ветвей в режиме двустороннего питания внутреннего КЗ невелика. Кроме того, если насыщение ТТ происходит не в первом периоде ПП, программа расчета взаимного угла токов плеч достоверно определяет величину этого угла, следовательно, $\cos \alpha < 0$, т. е. значение тормозного тока обнуляется (см. раздел 4.3) и торможение снимается. Однако насыщение может произойти в первом периоде, и взаимный угол между компонентами тока КЗ не удастся определить до насыщения ТТ, а в памяти микропроцессора сохранено его значение, рассчитанное в доаварийном режиме ($\cos \alpha > 0$). Если защищаемый объект, кроме питающих цепей, имеет ветвь нагрузки, то в режиме несимметричного внутреннего КЗ может сохраниться значительный ток нагрузки, который в соответствии с алгоритмом функционирования рассматриваемой ДЗТ (см. раздел 4.3) определяется в качестве тока I_2 . Тогда в результате расчета получается взаимный угол α между током питающей ветви с ненасыщенным ТТ и током ветви нагрузки, который соответствует режиму внешнего КЗ. В такой ситуации происходит задержка в срабатывании до тех пор, пока вторичный ток насыщенного ТТ не станет достаточным для корректного определения взаимного угла между токами питающих ветвей. Поэтому в тех случаях, когда задержка в срабатывании недопустима, при расчете защиты следует исходить из условия перекрытия диапазонов чувствительности ДЗТ и ДО.

Надо отметить, что в случае отсутствия перекрытия диапазонов чувствительности ДЗТ и ДО при любом внешнем КЗ со значением тока $I_k > B$, но не достигающим величины тока срабатывания ДО, защищаемый объект остается без основной защиты на все время существования КЗ.

7. ОСОБЕННОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ С НАПРАВЛЕННЫМ ТОРМОЖЕНИЕМ

В предыдущих разделах рассмотрены свойства направленного торможения, но не даны характеристики и особенности структуры ДЗ с такой системой торможения. Дифференциальная защита с направленным торможением (ДЗНТ) выполнена на основе использования микропроцессорных средств, имеет нелинейную характеристику с двумя изломами (см. рис. 5, кривая б), которой соответствует уравнение (14). Для придания свойства направленности торможению токи плеч защиты предварительно преобразуются в векторную форму. С этой целью входные сигналы обрабатываются цифровыми фильтрами основной гармоники, а алгоритмы защиты работают с первыми гармониками токов плеч. Тормозные токи каждой фазы формируются в соответствии с формулой (18). В этой формуле используется два тока, в то время как количество плеч схемы токовых цепей ДЗНТ может быть больше двух. Чтобы воспользоваться этой формулой, систему векторов токов плеч необходимо преобразовать к двум векторам. Поскольку торможение необходимо только в режимах внешних КЗ, первоначально исходят из предположения, что произошло именно внешнее КЗ, хотя режим защищаемого объекта пока не идентифицирован. В таком режиме в поврежденной ветви протекает наибольший ток. Поэтому один из сомножителей формулы (18) I_1 формируется по следующему условию:

$$I_1 = \max(I_j),$$

где I_j – модуль тока j -го плеча.

Токи всех остальных плеч замещаются модулем вектора эквивалентного тока с использованием следующей процедуры преобразования:

$$\dot{I}_2 = \sum_j \dot{I}_j - \dot{I}_1.$$

Свойство направленности торможения обеспечивается благодаря третьему сомножителю в формуле (18) $\cos \alpha$, причем величина α определяется как взаимный угол между векторами двух первых сомножителей, у которых за условно-положительное направление тока

принимается направление в режиме внешнего КЗ. При этом следует принимать во внимание, что на измерительные органы защиты поступает информация о реально существующих токах и параметры токов могут соответствовать режиму как внешнего, так и внутреннего КЗ – в зависимости от места повреждения. Чтобы соблюсти условия определения величины α в любом из возможных режимов, одному из сформированных векторов (I_1 или I_2) необходимо присвоить обратный знак. Поэтому в отечественной фирме ЭКРА принято

$$\alpha = \arg(\dot{I}_1) - \arg(-\dot{I}_2).$$

Алгоритм формирования тормозного тока при направленном торможении с использованием формулы (18) можно выразить следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} I_T &= \sqrt{I_1 I_2 \cos \alpha} && \text{при } \cos \alpha > 0 \\ I_T &= 0 && \text{при } \cos \alpha < 0. \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

Первый излом тормозной характеристики происходит при $I_T = I_{ТН}$ [в соответствии с уравнением (14)], однако в некоторых версиях алгоритмов ДЗНТ, выпускаемых как отечественными, так и зарубежными производителями, характеристика на участке торможения формируется таким образом, что этот участок является продолжением луча, выходящего из начала координат. Эту особенность необходимо учитывать при расчете защиты (см. раздел 8). Второй излом тормозной характеристики служит для повышения уровня отстроенности от токов небаланса в ПП, что рассмотрено в разделе 6, и проявляется только при $\cos \alpha > 0$.

Дифференциальный ток формируется из этих же компонентов:

$$\dot{I}_d = \dot{I}_1 + \dot{I}_2. \quad (32)$$

Такой способ определения дифференциального тока не противоречит принципу действия ДЗ, описанному уравнением (1). Если подставить в уравнение (32) значение вектора \dot{I}_2 , то получим уравнение, аналогичное уравнению (1), но в векторной форме. Поэтому все основные свойства ДЗНТ совпадают с рассмотренными в разделе 2, но они относятся к первой гармонике дифференциального тока.

В состав ДЗНТ входит ДО, которая обеспечивает защиту объекта в режимах, соответствующих области блокирования. Для дополнительного повышения уровня устойчивости функционирования в ДЗНТ предусмотрено торможение от сигнала, интенсивность которого зависит от отношения модулей второй и первой гармоник дифференциального тока. Кроме того, для повышения устойчивости функционирования ДЗНТ при внешних КЗ может быть применено динамическое торможение.

8. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

8.1. ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В общем случае условия расчета параметров срабатывания и проверки чувствительности ДЗ в полном объеме определяются особенностями защищаемого объекта. Однако основная часть из этих условий является обязательной для продольных ДЗ любого из объектов электрических станций и подстанций, и именно такие условия необходимо здесь рассмотреть. Расчету подлежат начальный ток срабатывания $I_{сн}$, коэффициент торможения K_t , ток начала торможения $I_{тн}$, а при наличии второго излома тормозной характеристики – ток излома B , если при токе излома осуществляется блокирование защиты. Если ДЗТ выполнена с двумя зонами чувствительности (ДЗТ и ДО), то дополнительно определяют ток срабатывания ДО. Затем находят коэффициент чувствительности.

Параметры срабатывания выбираются из условия отстройки от ложного сигнала максимальной интенсивности. Для ДЗ сосредоточенных объектов обязательна отстройка от расчетного тока небаланса, за основу которого принят ток установившегося процесса при расчетном сквозном токе:

$$I_{нб.расч} = K_o K_{пер} I_{\Sigma расч} \varepsilon + \sum_j \Delta_{пj} I_{п.расч j} + \sum_i \Delta_{oi} I_{о.расч i} , \quad (33)$$

где $K_{пер}$ – коэффициент, учитывающий возрастание тока небаланса в ПП; K_o – коэффициент однотипности, учитывающий различие характеристик ТТ; ε – полная погрешность ТТ в расчетном режиме; $I_{\Sigma расч}$ –

суммарный расчетный сквозной ток (обычно – ток поврежденной ветви); $\Delta_{цj} I_{п.расч j}$ – составляющая тока небаланса, обусловленная неточностью выравнивания j -го плеча $\Delta_{цj}$ по отношению к току плеча основной стороны (правила выбора основной стороны зависят от типа защищаемого объекта); $\Delta_{oi} I_{о.расч i}$ – составляющая тока небаланса, обусловленная особенностями защищаемого объекта (учитывается при защите трансформаторов и автотрансформаторов).

Отстройка от расчетного тока небаланса при максимальном сквозном токе посредством увеличения тока срабатывания применяется только в ДО. В ДЗТ для этой цели используется торможение. Начальный ток срабатывания отстраивается либо от тока небаланса при сквозном токе в режиме отсутствия торможения, либо по условию, отражающему специфические свойства защищаемого объекта. При этом от тока небаланса, вызванного максимальным сквозным током, ДЗТ отстраивается посредством выбора величины коэффициента торможения K_T . В ДЗТ с несимметричной схемой торможения оно отсутствует только тогда, когда отключена ветвь, ток плеча которой является тормозным током, а с симметричной – при сквозном токе, не превышающем ток начала торможения $I_{тн}$ (см. рис. 5). Поскольку ток начала торможения значительно меньше максимального сквозного тока, в формуле (33) принимают $K_{пер} = 1$, $\varepsilon = 0,03 \dots 0,05$.

8.2. ТОК СРАБАТЫВАНИЯ

Ток срабатывания ДО определяется по расчетному току небаланса, вычисленному по формуле (33):

$$I_c = K_n I_{нб.расч}, \quad (34)$$

где $K_n = 2$.

При определении расчетного тока небаланса за расчетный сквозной ток принимают больший из токов в двух следующих режимах: КЗ на границе зоны защиты с максимальным током или ток при несинхронном включении (например, несинхронное АПВ).

Ток срабатывания ДЗТ с симметричной схемой торможения и нелинейной тормозной характеристикой определяется также по формуле (34), но при величине $K_n = 1,5$. Однако практически всегда при

определении расчетного тока небаланса формулу (33) можно упростить, так как максимальное значение искомого тока, как правило, существует в режиме, при котором в образовании всех трех компонентов участвует один и тот же ток $I_{\text{тн}}$, и тогда

$$I_{\text{нб,расч}} = I_{\text{тн}} (K_0 \varepsilon + \Delta_{\text{п}} + \Delta_0). \quad (35)$$

Исключение составляет случай защиты автотрансформатора, если ток начала торможения может образоваться только в том рабочем режиме, когда полностью загружена обмотка низшего напряжения. В этом случае приходится использовать формулу (33), в которой $I_{\text{расч}} = I_{\text{тн}}$, а остальные токи могут быть или равными $I_{\text{тн}}$, или составлять его части. Величины $I_{\text{сн}}$ и $I_{\text{тн}}$ принимаются на основании рекомендаций фирм-изготовителей, а затем значение $I_{\text{сн}}$ уточняется по формуле (35).

Ток срабатывания ДЗТ с несимметричной схемой торможения и нелинейной тормозной характеристикой, тормозной ток которой формируется из более чем одного плеча, определяется таким же способом, как и в ДЗТ с симметричной схемой торможения. Более сложно вычисляется этот ток в ДЗТ, использующей в качестве тормозного ток одного из плеч, при дву- или многостороннем питании защищаемого объекта. В этом случае ток срабатывания приходится определять посредством вариантных расчетов, так как он непосредственно зависит от того, ток какого плеча является тормозным. Поэтому в процессе расчета поочередно определяется ток срабатывания для вариантов использования в качестве тормозного тока каждого из токов плеч, причем сторона, в которой ток плеча является тормозным в рассчитываемом варианте, считается отключенной. Поскольку и в таких условиях ДЗТ должна быть отстроена от внешних КЗ, ее ток срабатывания в этом режиме определяется точно так же, как и у ДО. За расчетный принимается тот вариант, в котором ток срабатывания оказался наименьшим.

8.3. КОЭФФИЦИЕНТ ТОРМОЖЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

Чтобы надежно отстроить ДЗТ от максимальных токов небаланса в режимах внешних КЗ с помощью торможения токами плеч, коэффициент торможения $K_{\text{т}}$ необходимо выбрать по таким расчетным режи-

мам, в которых значительный ток небаланса сопровождается тормозным током относительно малой интенсивности. Поскольку зависимость тока срабатывания от тормозного тока может быть выражена как тангенс угла наклона тормозной характеристики (см. рис. 5), в общем случае

$$K_T = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_T}. \quad (36)$$

При линейной тормозной характеристике, выходящей из $I_{сн}$, приращение тормозного тока может быть принято равным тормозному току и тогда

$$K_T = \frac{K_n I_{нб.расч} - I_{сн}}{I_T}. \quad (37)$$

Следует отметить, что в подавляющем большинстве выпускаемые в настоящее время ДЗТ используют нелинейные тормозные характеристики, полученные на основе линейных характеристик. В зависимости от вида ее реализации меняется и формула расчета коэффициента торможения.

1. Тормозная характеристика является лучом, исходящим из начала координат, тангенс угла наклона которого равен коэффициенту торможения, а начальный ток срабатывания отображается прямой, параллельной оси абсцисс, причем абсцисса точки пересечения этих прямых является начальным током торможения (рис. 14). Для такой характеристики при $I_T > I_{тн}$ приращение тока срабатывания может быть принято равным току срабатывания, и тогда

$$K_T = \frac{K_n I_{нб.расч}}{I_T}. \quad (38)$$

Важно, что при такой характеристике начальный ток торможения зависит от величин начального тока срабатывания и коэффициента торможения (рис. 14). Поэтому для этого вида характеристики начальный ток торможения определяется по следующей формуле:

$$I_{тн} = \frac{I_{сн}}{K_T}. \quad (39)$$

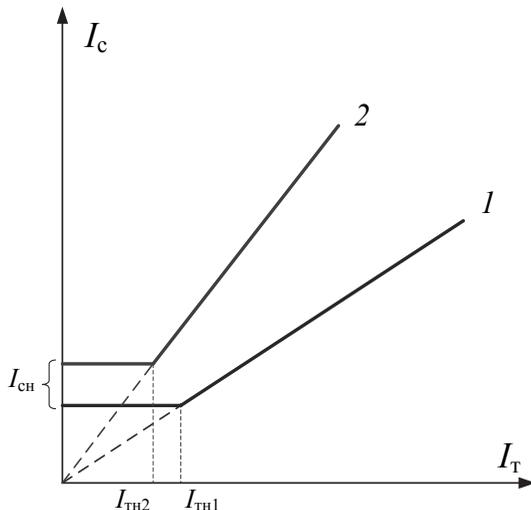


Рис. 14. Тормозная характеристика ДЗТ, проходящая по лучу из начала координат

При расчетах ДЗТ с рассматриваемой тормозной характеристикой целесообразно сначала определить коэффициент торможения и принять величину $I_{сн}$ по рекомендации фирмы-изготовителя ДЗТ, а затем определить величину $I_{тн}$ по формуле (39) и уточнить принятое значение $I_{сн}$.

2. Для нелинейной тормозной характеристики, в которой наклонный участок не привязан к началу координат (т. е. может начинаться от любой точки горизонтального участка и зависит только от коэффициента торможения), коэффициент торможения равен

$$K_T = \frac{K_n I_{нб.расч} - I_{сн}}{I_T - I_{тн}}. \quad (40)$$

В общем случае определение расчетного значения коэффициента торможения ДЗТ производится посредством вариантных расчетов. Для этого коэффициент торможения рассчитывается при внешних КЗ на тех ветвях, повреждение которых вызывает разные величины сквозных или тормозных токов. В качестве расчетной величины принимают наибольшую из полученных величин коэффициентов торможения.

8.4. ТОК ИЗЛОМА ТОРМОЗНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В настоящее время наиболее распространенным вариантом тормозных характеристик с изломом является вариант, в котором при токе излома происходит блокирование ДЗТ (т. е. $K_{\text{ти}} = \infty$), хотя в общем случае величина коэффициента торможения после излома характеристики $K_{\text{ти}}$ может быть любой. Здесь рассматривается вариант характеристики с $K_{\text{ти}} = \infty$.

В большинстве существующих защит с направленным торможением применяется блокирование чувствительного канала в случае, если тормозной ток и каждый из его компонентов превышают порог блокирования (30). При отсутствии искажений токов плеч в режимах внутренних КЗ в ДЗТ с этим способом формирования тормозного сигнала торможение отсутствует, так как $\cos \alpha < 0$, а следовательно, торможение снимается вне зависимости от соблюдения условия (30). Но в ПП насыщение ТТ может произойти значительно раньше, чем завершится вычисление взаимного угла между компонентами тормозного тока. При постепенном нарастании вторичного тока в ПП может существовать значительная погрешность в определении фазы первой гармоники вторичного тока насыщенного ТТ, причем на мощных электрических станциях она может сохраняться до 0,3...0,5 с. Вместе с тем величины токов плеч до момента насыщения в первом периоде ПП могут быть достаточно большими, и поэтому тормозной ток может быть сформирован при значении взаимного угла доаварийного режима. Кроме того, большинство КЗ – несимметричные, и поэтому основой тока I_2 может быть ток ветви нагрузки. В этом случае взаимный угол компонентов тормозного тока соответствует режиму внешнего КЗ. В результате ДЗТ может сработать только после значительного затухания апериодической составляющей, т. е. после выхода ТТ из насыщения. Однако если при столь значительных токах КЗ срабатывает ДО, то сбои в процедурах определения взаимного угла и большего из токов плеч не влияют на работу защиты. Поэтому желательно для избежания существенных задержек в срабатывании ДЗТ также согласовывать величину параметра B с током срабатывания ДО, особенно в случае ДЗТ блока. Но при существующих исполнениях ДО такая возможность почти всегда отсутствует. Действительно, из-за необходимости отстройки тока срабатывания ДО от максимального тока небаланса ПП (и от броска намаг-

ничающего тока при защите трансформаторов) фирмы-изготовители рекомендуют принимать величину кратности тока срабатывания ДО не менее 6. Поэтому согласование может дать эффект лишь в том случае, если может быть обосновано существенное снижение тока срабатывания ДО. При этом целью согласования является достижение таких параметров настройки защиты, которые удовлетворяют следующим неравенствам:

$$(I_1, I_2, I_T) \leq B, I_K > I_{ДО}, \quad (41)$$

где I_K – ток внутреннего КЗ, при котором определены токи I_1, I_2, I_T .

При таком согласовании за расчетный должен быть принят режим внутреннего КЗ, в котором формируется тормозной ток $I_T > 0$. Такой режим возможен, например, на электрических станциях малой и средней мощности, связанных с мощной энергосистемой линией, имеющей малую пропускную способность. При работе такой станции на пределе статической устойчивости взаимный угол между ЭДС станции и системой δ достигает предельного значения. Кроме того, аргументы сопротивлений ветвей станции и энергосистемы в расчетной схеме токов КЗ могут различаться на значительный угол (до $20 \dots 30^\circ$). В результате этого возможно, что угол α будет меньше 90° и торможение в режиме внутреннего КЗ не исчезнет. Следует отметить, что исходные данные для согласования по условию (41) в таком случае можно получить только по результатам расчета режима.

Если задержка в срабатывании ДЗТ допустима, то величину параметра B можно не согласовывать с током срабатывания ДО. Тогда достаточно ее отстроить от значения максимального сквозного тока нагрузки в режимах несимметричных внутренних КЗ. В рассматриваемом режиме наличие тока в ветви нагрузки обуславливает величину $\alpha > 0$, т. е. в соответствии с условием (18) режим может быть ложно идентифицирован как внешнее КЗ. Заметим, что ток нагрузки I_H образуется в ее ветви источником питания. Поэтому в питающей ветви протекает сумма токов КЗ и нагрузки, т. е. ток нагрузки меньше тока питающей ветви, $I_H = I_2$, а следовательно, если $B > I_H$, то справедливо и $B > (I_T, I_1, I_2)$. Такое снижение значения B существенно облегчает отстройку ДЗТ от токов небаланса в ПП.

Необходимо отметить, что если защищаемым объектом является генератор (или один из элементов блока генератор–трансформатор), который может включаться в работу методом самосинхронизации, то для уменьшения задержки срабатывания рассматриваемой ДЗТ в качестве максимального сквозного тока нагрузки следует принимать ток самосинхронизации. Это объясняется возможностью возникновения несимметричного внутреннего КЗ после включения в сеть в процессе самосинхронизации (например, однофазное КЗ на стороне высшего напряжения). Однако при отсутствии повышенных требований к быстрдействию защиты это условие можно не учитывать.

8.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Приемлемость выбранных параметров срабатывания ДЗТ для рассматриваемого защищаемого объекта оценивается по величине минимально возможного коэффициента чувствительности $k_{\text{ч}}$. Его нормативное значение, с которым сопоставляется полученное при расчете, $k_{\text{ч,норм}} = 2$. Расчет коэффициента чувствительности ДЗТ не отличается от аналогичного расчета для любой другой защиты. Для этого по наименьшему току КЗ (из всех возможных их видов в расчетной точке) минимального режима в той точке зоны защиты, где ток в месте КЗ минимален $I_{\text{кmin}}$ и по току срабатывания отсечки $I_{\text{ДО}}$ определяется искомый показатель

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{кmin}}}{I_{\text{ДО}}}. \quad (42)$$

Коэффициент чувствительности ДЗТ с несимметричной схемой торможения определяется в общем случае в трех режимах: КЗ в режиме опробования подачей напряжения с одной из сторон защищаемого объекта; КЗ в режиме с отключенной стороной, ток плеча которой является тормозным током (режим без торможения при несимметричной схеме торможения); КЗ в режиме работы защищаемого объекта по штатной схеме (режим с торможением). Если защищаемый объект обладает собственным сопротивлением, расчет в первом из названных режимов проводится для точки КЗ, расположенной за защищаемым

объектом на ветви с наибольшим сопротивлением. В этом режиме допускается величина коэффициента чувствительности меньше двух, причем нормативная величина устанавливается в зависимости от вида защищаемого объекта. Во втором режиме за расчетную точку КЗ принимают ветвь, со стороны которой расположен наименее мощный источник (т. е. имеющий наибольшее сопротивление в минимальном режиме ЭЭС). В последнем из названных режимов в общем случае расчет ведется для точек КЗ со всех сторон защищаемого объекта (т. е. для всех возможных сочетаний тормозного и дифференциального токов). Однако в этом режиме ток срабатывания ДЗТ зависит от тормозного тока. Ток срабатывания определяется графически по тормозной характеристике исходя из следующих соображений. Расчетное значение тока КЗ определяется для условий металлического замыкания при тормозном токе, существующем при КЗ в расчетной точке. В то же время большинство КЗ – дуговые, т. е. через переходное сопротивление. В общем случае защищаемый объект имеет ветви нагрузки, т. е. ветви, не имеющие собственного источника питания. Поскольку расчетным видом КЗ всегда является несимметричное КЗ, при котором в месте повреждения сохраняются напряжения прямой и обратной последовательности, сохраняется и ток в цепи нагрузки, который увеличивает тормозной ток. Переходное сопротивление в месте КЗ увеличивает эти напряжения, а значит, возрастают и токи нагрузки, и тормозной ток. Предполагается, что в расчетных условиях при значительном возрастании переходного сопротивления напряжение в месте КЗ достигает величины, соизмеримой с номинальной, а значение тока нагрузки – с номинальным током $I_{ном}$. Естественно, рост переходного сопротивления вызывает уменьшение тока КЗ. Поэтому, если отражать изменения величин токов КЗ и тормозного в поле координат тормозной характеристики в виде расчетной точки КЗ, то эта точка с ростом переходного сопротивления не только снижается, но и смещается в сторону оси ординат, так как с уменьшением тока повреждения уменьшается и тормозной ток. Для упрощения расчетов принимают, что эта траектория – прямая линия, направленная из расчетной точки в плоскости координат тормозной характеристики, полученной по результатам расчета металлического КЗ, в точку на оси абсцисс $I_{т.ном}$ (рис. 15, прямая КН). Ордината точки пересечения этой прямой с тормозной характеристикой и есть искомый ток срабатывания ДЗТ при

наличии торможения $I_{сч}$. Если в ДЗТ использована линейная тормозная характеристика, ток срабатывания может быть определен аналитически по тем же формулам, что и для ДЗТ с симметричной схемой формирования тормозного сигнала (см. ниже). Режим работы ЭЭС, вид КЗ и расчетная точка КЗ выбираются из тех же соображений, что и при расчете коэффициента чувствительности ДО. Расчет величины коэффициента чувствительности во всех режимах ведется по формуле (42).

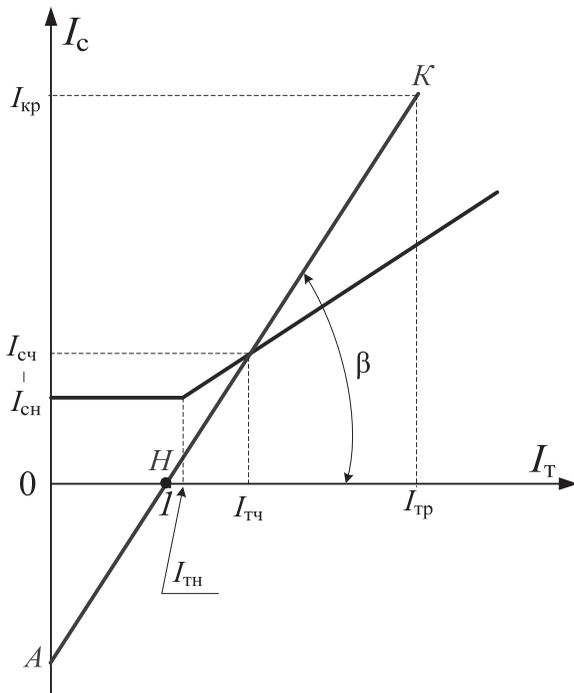


Рис. 15. Поясняющая схема определения чувствительности ДЗ с нелинейной тормозной характеристикой

ДЗТ с симметричной схемой торможения, как правило, имеют нелинейную тормозную характеристику, показанную на рис. 15, которая состоит из отрезков прямых. Это дает возможность рассчитывать

аналитически ток срабатывания защиты, увеличенный под влиянием торможения, в режимах внутренних КЗ при сохранении тока нагрузки. Для этого в координатах тормозной характеристики наносят расчетную точку КЗ К с координатами $(I_{тр}, I_{кр})$, полученную по результатам вычисления токов в расчетном по чувствительности режиме. В соответствии с описанным методом расчета необходимо определить величину тормозного тока при сквозном токе, равном номинальному току защищаемого объекта (по формуле формирования тормозного тока), и отложить полученную величину на оси ординат. Если тормозная характеристика построена в относительных единицах, полученная величина тормозного тока равна единице (точка Н на рис. 15). Соединив точки К и Н, получим точку пересечения этой прямой с тормозной характеристикой, ордината которой определяет расчетное по чувствительности значение тока срабатывания $I_{сч}$. Абсциссу этой точки $I_{тч}$ нетрудно найти как решение системы уравнений, описывающих прямые КН и наклонный участок тормозной характеристики. Уравнение наклонного участка тормозной характеристики известно, а уравнение прямой КН можно получить следующим образом. Если продолжить эту прямую до пересечения с осью ординат (точка А), получим начальную ординату прямой АК.

Зная $\operatorname{tg} \beta = \frac{I_{ср}}{(I_{тн} - 1)}$ и отрезок $OA = \operatorname{tg} \beta$, после простых преобразований исходные уравнения имеют вид (в относительных единицах)

$$\left. \begin{aligned} I_c &= I_{сн} + K_T(I_T - I_{тн}) \\ I_k &= \frac{I_{кр}}{I_{тр} - 1}(I_T - 1). \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

В точке пересечения рассматриваемых прямых $I_c = I_{сч}$, а $I_T = I_{тч}$. После некоторых преобразований решение этой системы приобретает следующий вид:

$$I_{тч} = \frac{I_{кр} + (I_{сн} - K_T I_{тн})(I_{тр} - 1)}{I_{кр} - K_T(I_{тр} - 1)}. \quad (44)$$

Тогда искомый ток срабатывания есть

$$I_{сч} = I_{сн} + K_T(I_{тч} - I_{тн}). \quad (45)$$

В частном случае, когда нелинейная характеристика построена с использованием луча из начала координат, уравнение наклонной части есть

$$I_c = K_T I_T. \quad (46)$$

Поэтому выражение для определения тока $I_{тч}$ получается после подстановки в формулу (44) $(I_{сн}, I_{тн}) = 0$, так как значения этих токов не определяют однозначно положение начальной точки наклонной части тормозной характеристики (оно зависит от параметров $I_{сн}$ и K_T , но эта точка всегда лежит на прямой, выходящей из начала координат).

Для ДЗТ с линейной тормозной характеристикой ток $I_{сч}$ можно определить, если в формулу (44) подставить $I_{тн} = 0$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Федосеев А.М.* Релейная защита электроэнергетических систем: учебник для вузов / А.М. Федосеев, М.А. Федосеев. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.
2. *Беркович М.А.* Основы техники релейной защиты: 6-е изд., перераб. и доп / М.А. Беркович, В.В. Молчанов, В.А. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 376 с.
3. *Багинский Л.В.* Релейная защита электрических сетей от междуфазных коротких замыканий: учеб. пособие / Л.В. Багинский. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 106 с.
4. Реле Micom P342, P343. Защита генераторов [Электронный ресурс] // Техническое описание. TG8614A, Том 1 – ALSTOM T&D Protection & Control Ltd. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с титул. экрана.
5. *Ульянов С.А.* Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С.А. Ульянов. – М.; Л.: Энергия, 1964. – 704 с.
6. *Подгорный Э.В.* Моделирование и расчеты переходных режимов в цепях релейной защиты / Э.В. Подгорный, С.Д. Хлебников; под ред. А.Д. Дроздова. – М.: Энергия, 1974. – 208 с.

**Глазырин Владимир Евлампиевич
Осницев Анатолий Анатольевич**

**ВЫПОЛНЕНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ
И ПОДСТАНЦИЙ**

Учебное пособие

Редактор *И.Л. Кескевич*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *Л.Н. Кишит*
Дизайн обложки *А.В. Ладьяжская*
Компьютерная верстка *Н.В. Гаврилова*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 19.12.2017. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная
Тираж 50 экз. Уч.-изд. л. 4,18. Печ. л. 4,5. Изд. 271. Заказ № 124
Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20