

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРОВ, ОСНОВАННАЯ НА РАВНОВЕСИИ НАПРЯЖЕНИЙ

Н. В. ЛИСЕЦКИЙ

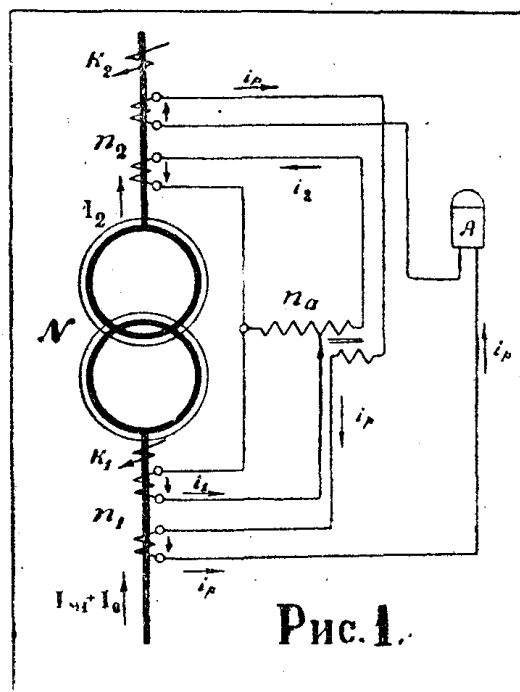
В настоящее время дифференциальные защиты трансформаторов, как правило, выполняются по схемам с циркуляцией токов. Однако, применительно к генераторам, защита, основанная на равновесии напряжений, имеет ряд преимуществ перед защитой по схеме с циркуляцией токов [1]. Поэтому целесообразно рассмотреть возможность применения такой защиты и для трансформаторов.

Схема одного из принципиально возможных вариантов выполнения защиты с уравновешенными напряжениями для однофазного или одной фазы трехфазного трансформатора, имеющего схему соединения обмоток $\Delta/\Delta-12$, приведена на рис. 1.

Трансформаторы тока, входящие в схему, имеют по две вторичные обмотки на одном общем керне. Одна из вторичных обмоток каждого трансформатора тока включена в схему на циркуляцию токов. Вторые обмотки соединены встречно, образуя цепь равновесия напряжений. Для полного уравновешивания напряжений в упомянутую цепь включена дополнительная обмотка автотрансформатора. Число витков этой обмотки подбирается так, чтобы сумма электродвижущих сил в цепи реле при номинальном режиме работы и сквозных коротких замыканиях была бы равна нулю.

При нормальном режиме работы трансформатора ампервитки первичных обмоток трансформаторов тока уравновешиваются ампервитками вторичных обмоток, включенных по схеме циркуляции токов.

Магнитные потоки в сердечниках трансформаторов тока определяются величиной электродвижущей силы, необходимой для покрытия падения напряжения в цепи циркуляции токов, и ошибками автотрансформатора. Магнитный поток сердечника автотрансформатора определяется разностью ампервитков обмоток, включенных в цепь циркуляции. Магнитные потоки незначительны по величине, а следовательно, невелики и электродвижущие силы, наводимые во встречно включенных обмотках трансформаторов.



Через реле протекают токи небаланса за счет некоторой разности электродвижущих сил вторичных обмоток, обусловленных неидентичностью характеристик трансформаторов.

При коротком замыкании вне зоны защиты магнитная индукция в сердечниках трансформаторов тока возрастает, увеличивается разность электродвижущих сил и увеличиваются токи небаланса. Во избежание ложного действия защиты ток трогания реле должен быть выше возможного тока небаланса при сквозных коротких замыканиях.

При коротком замыкании в зоне защиты ампервитки оказываются неуравновешенными. При этом во встречно включенных обмотках трансформаторов тока наводятся неодинаковые электродвижущие силы, и через реле протекает ток, приводящий защиту в действие.

Аналогичное явление может получиться и при включении трансформатора. Однако, значительная часть несимметричного ударного намагничивающего тока, при соответствующем подборе параметров схемы или включении реле через быстронасыщающийся трансформатор, может быть отведена в цепи намагничивания, и защита может не действовать.

При сравнении данного вида защиты с защитой, выполненной по схеме с циркуляцией тока, может оказаться, что данный вид защиты более чувствителен и надежен в эксплуатации по следующим причинам.

Сопротивление цепи равновесия напряжений в несколько раз больше сопротивления цепи циркуляции и изменяется в меньшей мере в зависимости от величины тока в первичной цепи. Это приводит к увеличению отсоса в цепь циркуляции при включении трансформатора на холостой ход и тем самым облегчает отстройку защиты от действия ударных намагничивающих токов. Затухание переходных процессов в цепи равновесия напряжений будет происходить быстрее, чем в цепи циркуляции токов, так как активное сопротивление всех ее элементов оказывается включенным последовательно и постоянная времени $T = \frac{L}{r}$ для этой цепи будет меньше, что также увеличит селективность работы защиты.

Кроме того, защита с уравновешенными напряжениями имеет ряд эксплуатационных преимуществ по сравнению с защитой, выполненной по схеме с циркуляцией токов.

Одним из недостатков дифференциальной защиты, выполненной по схеме с циркуляцией токов, является действие защиты при обрывах цепи циркуляции. Защита с уравновешенными напряжениями обладает этим же недостатком, тем не менее эта защита все же имеет преимущества, так как ее цепь циркуляции весьма проста, она может не заводиться на релейный щит, не иметь промежуточных клеммных сборок и может быть выполнена поэтому весьма надежно.

Второе важное преимущество—это удобство проверок селективности защиты при любом насыщении железа трансформаторов тока.

При обычном методе проверки селективности путем установки закоротки вне зоны защиты и подъема тока с нуля в цепь циркуляции токов следует ввести реостаты. Меняя сопротивление последних, можно проверить величину тока небаланса при различных насыщениях железа трансформаторов тока.

Для окончательного суждения о защите, основанной на равновесии напряжений, необходимо рассмотреть вопросы ее чувствительности и селективности. Затем произвести сравнение с защитой, выполненной по схеме циркуляцией токов, как это сделал Г. В. Зевеке применительно к защите генераторов [1], и произвести необходимые эксперименты.

Чувствительность защиты

(без учета тока небаланса)

При рассмотрении вопросов чувствительности будем исходить из схемы рис. 1, при замыкании в точке „ K_1 “. Принятые направления токов показаны на схеме. Во всех выводах обозначения комплексной формы опущены. Сопротивления и токи, протекающие в схеме, обозначены следующим образом:

I_{n1} и I_2 —первичный и вторичный токи нагрузки (или короткого замыкания) силового трансформатора, имеющего коэффициент трансформации N , равный отношению линейных напряжений; I_0 —ток холостого хода силового трансформатора; i_1 и i_2 —вторичные токи трансформаторов тока защиты, имеющих коэффициенты трансформации n_1 и n_2 и сопротивления ветвей холостого хода z_{01} и z_{02} ; i_{01} и i_{02} —намагничивающие токи этих трансформаторов тока; i_{0a} —намагничивающий ток автотрансформатора, имеющего коэффициент трансформации n_a и сопротивление ветви холостого хода z_{0a} ; i_p —ток, протекающий через реле; z_p —сопротивление цепи равновесия напряжений; z_1 и z_2 —полные сопротивления всех последовательно соединенных элементов цепи циркуляции (обмотки трансформаторов тока, соединительные провода и пр.).

Коэффициент трансформации обмоток автотрансформатора, включенных в цепь циркуляции, из условий уравнивания вторичных токов при нормальной работе силового трансформатора и сквозных коротких замыканиях, принят:

$$n_a = \frac{Nn_2}{n_1} \quad (1)$$

Коэффициент трансформации для обмотки автотрансформатора, включенной в цепь равновесия напряжений, из условия компенсации разности электродвижущих сил вторичных обмоток трансформаторов тока, при аналогичных условиях работы должен быть

$$n'_a = 1 - n_a \quad (2)$$

n'_a —представляет некоторый условный коэффициент трансформации, произведение которого на электродвижущую силу автотрансформатора дает электродвижущую силу вольтодобавочных витков, которая компенсирует разность электродвижущих сил трансформаторов тока.

Допуская, что падение напряжения в сопротивлениях z_1 и z_2 мало, можно считать, что

$$e_1 = e_a = \frac{e_2}{n_a} \quad (3)$$

Если число витков обмоток трансформаторов тока, включенных в цепь равновесия напряжений, соответственно равно числу витков обмоток, включенных в цепь циркуляции, то на основании второго закона Кирхгофа для цепи реле можно записать

$$e_1 - e_a(1 - n_a) + e_2 = i_p z_p \quad (4)$$

На основании первого закона Кирхгофа для схем замещения трансформаторов тока, намагничивающие токи последних выразятся:

а) трансформатора тока „1“

$$i_{01} = \frac{I_1}{n_1} - i_1 - i_p \quad (5)$$

б) автотрансформатора

$$i_{0a} = i_1 - i_2 n_a + i_p (1 - n_a); \quad (6)$$

в) трансформатора тока „2“

$$i_{02} = i_2 - i_p. \quad (7)$$

Электродвижущие силы связаны с токами намагничивания следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} e_1 &= i_{01} z_{01}, \\ e_2 &= i_{02} z_{02}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$e_a = i_{0a} z_{0a}. \quad (10)$$

Исключая из (3) и (4) e_2 и e_a и подставляя значение e_1 из (8), находим

$$i_{01} = i_p \frac{z_p}{2z_{01} n_a}. \quad (11)$$

Исключая из (3) и (4) e_1 и e_a и подставляя значение e_2 из (9), получим

$$i_{02} = i_p \frac{z_p}{2z_{02}}. \quad (12)$$

Исключая из (3) и (4) e_1 и e_2 и подставляя значение e_a из (10), находим

$$i_{0a} = i_p \frac{z_p}{2z_{0a} n_a}. \quad (13)$$

Решая совместно уравнения (7) и (12), имеем

$$i_2 = i_p + i_{02} = i_p + i_p \frac{z_p}{2z_{02}} = i_p \left(1 + \frac{z_p}{2z_{02}} \right). \quad (14)$$

Подставляя значение i_{0a} из (13) и i_2 из (14) в (6), находим

$$\begin{aligned} i_1 = i_{0a} + i_2 n_a - i_p (1 - n_a) &= i_p \frac{z_p}{2z_{0a} n_a} + i_p \left(1 + \frac{z_p}{2z_{02}} \right) n_a - \\ &- i_p (1 - n_a) = 2i_p n_a - i_p + i_p \frac{z_p}{2z_{0a} n_a} + i_p \frac{z_p}{2z_{02}} n_a. \end{aligned} \quad (15)$$

Подставляя значение i_1 из (15) и i_{01} из (11) в (5), находим связь между первичным током и током в реле

$$\begin{aligned} i_p \frac{z_p}{2z_{01} n_a} &= \frac{I_1}{n_1} - 2i_p n_a + i_p - i_p \frac{z_p}{2z_{0a} n_a} - i_p \frac{z_p}{2z_{02}} n_a - i_p; \\ \frac{I_1}{n_1} &= 2i_p n_a + i_p \frac{z_p}{2z_{01} n_a} + i_p \frac{z_p}{2z_{0a} n_a} + i_p n_a \frac{z_p}{2z_{02}} = \\ &= i_p n_a \left[2 + \frac{z_p}{2} \left(\frac{z_{02} z_{0a} n_a^2 + z_{01} n_a^2 z_{02} + z_{01} n_a^2 z_{0a} n_a^2}{z_{01} n_a^2 \cdot z_{0a} n_a^2 \cdot z_{02}} \right) \right] \end{aligned} \quad (16)$$

Беря первую производную от $\left(\frac{I_1}{n_1} \right)$ по i_p и приравнявая ее нулю, найдем условия минимума для $\left(\frac{I_1}{n_1} \right)$, при котором будет работать защита,

$$\frac{d \left(\frac{I_1}{n_1} \right)}{di_p} = n_a \left[2 + \frac{z_p}{2} \left(\frac{z_{02} z_{0a} n_a^2 + z_{01} n_a^2 z_{02} + z_{0a} n_a^2 \cdot z_{01} n_a^2}{z_{01} n_a^2 \cdot z_{0a} n_a^2 \cdot z_{02}} \right) \right] = 0.$$

Отсюда абсолютная величина сопротивления цепи реле будет

$$z_p = 4 \left(\frac{z_{01} n_a^2 \cdot z_{0a} n_a^2 z_{02}}{z_{01} n_a^2 \cdot z_{02} + z_{0a} n_a^2 \cdot z_{02} + z_{01} n_a^2 z_{0a} n_a^2} \right). \quad (17)$$

Сравнивая полученное равенство с выражением сопротивления реле для защиты с циркулирующими токами (см. работу автора „Увеличение чувствительности и селективности дифференциальной защиты силовых трансформаторов“), легко заметить, что величина наивыгоднейшего сопротивления цепи реле для защиты с уравновешенными напряжениями в 4 раза больше, чем у защиты с циркулирующими токами.

Аналогичные соотношения для защит генераторов были получены Г. В. Зевеке [1]. Следовательно, все выводы, сделанные им для защиты генераторов, справедливы и для защиты трансформаторов, то есть при одинаковом числе витков вторичных обмоток и одинаковых сердечниках трансформаторов тока, к которым присоединены реле в обеих схемах, условия равной чувствительности защит сводятся к следующему:

1. Ток трогания защиты с циркулирующими токами должен быть в 2 раза большим тока трогания защиты с уравновешенными напряжениями.
2. Сопротивление цепи реле защиты с циркулирующими токами должно быть в 4 раза меньшим по сравнению с сопротивлением цепи реле защиты, основанной на равновесии напряжений.

Токи небаланса и возможность селективной работы защиты

При выводе выражения для тока небаланса будем исходить из схемы рис. 1 при замыкании в точке „K₂“. Обозначениями для токов и сопротивлений воспользуемся теми же, что и во всех предыдущих выводах.

На основании первого закона Кирхгофа, для схемы замещения трансформатора тока „1“ можно записать:

$$\frac{I_{n1} + I_0}{n_1} = i_1 + i_p + i_{01}, \quad (18)$$

для схемы замещения автотрансформатора

$$i_1 + i_p(1 - n_a) - i_{0a} = i_2 n_a, \quad (19)$$

для схемы замещения трансформаторов тока „2“

$$\frac{I_2}{n_2} = \frac{I_{n1}}{N n_2} = i_2 - i_p + i_{02}. \quad (20)$$

Подставив в выражение (19) значения i_1 и i_2 из (18) и (20) и заменив n_a согласно (1), получим

$$\begin{aligned} \frac{I_{n1}}{n_1} + \frac{I_0}{n_1} - i_p - i_{01} + i_p(1 - n_a) - i_{0a} &= \frac{I_{n1}}{N n_2} \cdot \frac{N n_2}{n_1} + i_p n_a - i_{02} n_a; \\ \frac{I_0}{n_1} - i_{01} - i_{0a} + i_{02} n_a &= 2 i_p n_a. \end{aligned}$$

Отсюда ток в реле, являющийся током небаланса, будет

$$i_p = i_{нб} = \frac{1}{2} \left[\frac{I_0}{n_1 n_a} - \frac{i_{01}}{n_a} - \frac{i_{0a}}{n_a} + i_{02} \right]. \quad (21)$$

Из сравнения полученного равенства с выражением тока небаланса для защиты с циркулирующими токами (см. цитированную выше работу автора) видно, что выражение (21) отличается от аналогичного выражения для защиты с циркулирующими токами только множителем 1/2. Следовательно,

условия подбора и расстановки оборудования схемы остаются такими же, как и для защиты с циркулирующими токами. При этом токи небаланса получаются вдвое меньшими по сравнению с токами небаланса защиты, выполненной по схеме с циркулирующими токами.

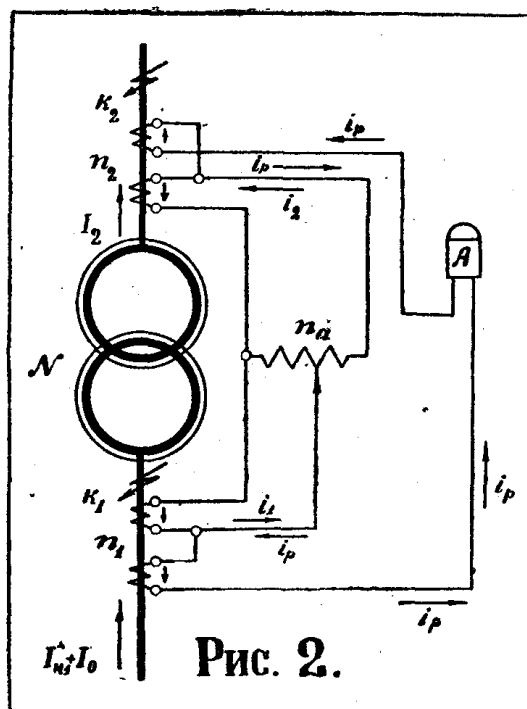
Условия селективности работы защиты остаются также прежними. Только сопротивление реле для защиты, основанной на равновесии напряжений, следует выбирать в 4 раза большим, чем для защиты с циркулирующими токами.

Упрощение принципиальной схемы и составление схем защиты трехфазных трансформаторов

В схеме рис. 1, для компенсации разности электродвижущих сил цепи равновесия напряжений, предусматривается на автотрансформаторе дополнительная обмотка. Если у трансформаторов тока число витков обеих вторичных обмоток одинаково, то число витков этой дополнительной обмотки подбирается так, чтобы обеспечить коэффициент трансформации, равный

$$n'_a = 1 - n_a.$$

Такой же коэффициент трансформации может обеспечить часть обмотки автотрансформатора, представляющая собой разность чисел витков, включенных в плечи цепи циркуляции. Поэтому целесообразно не наматывать дополнительной обмотки, а использовать указанную часть обмотки.



и для компенсации разности электродвижущих сил в цепи равновесия напряжений, как это указано на схеме рис. 2.

Полученная схема много проще предыдущей; она не требует дополнительной обмотки автотрансформатора и экономит значительное количество соединительных проводов. Экспериментальные исследования схемы рис. 2 показали, что все выводы, сделанные для схемы рис. 1, справедливы и для

данной схемы, поэтому при компоновке трехфазных схем защиты трансформаторов целесообразнее исходить из схемы рис. 2.

У трехфазных трансформаторов с соединением обмоток Δ/Δ —12 первичные и вторичные напряжения и токи совпадают по фазе. Поэтому схема защиты для такого трансформатора будет представлять собой трехфазное исполнение схемы рис. 2, что и показано на рис. 3.

У трехфазных трансформаторов с соединением обмоток Δ/Δ —11 вторичные напряжения и токи сдвинуты относительно первичных на 30 градусов. В цепях дифференциальной защиты этот сдвиг необходимо компенсировать. Для этого, как известно, приведенные величины токов и электро-

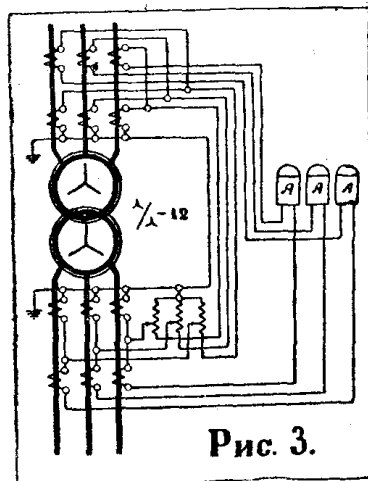


Рис. 3.

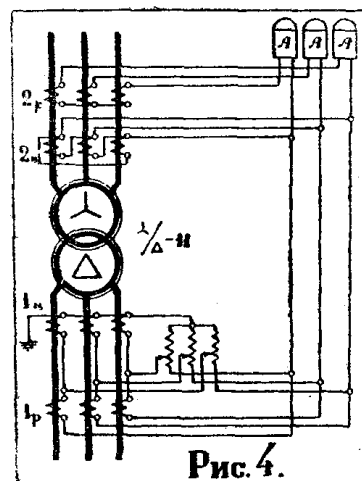


Рис. 4.

движущих сил вторичных обмоток трансформаторов тока, расположенных на стороне треугольника, следует сравнивать с разностью токов и электро-движущих сил трансформаторов тока, установленных на стороне звезды. Схема защиты, основанная на указанных положениях, изображена на рис. 4.

Цепь циркуляции защиты в этой схеме осуществлена обмотками трансформаторов тока „1 ц“, „2 ц“ и автотрансформатором. Цепь равновесия напряжений выполнена при помощи обмоток трансформаторов „1р“, „2р“ и частью обмотки автотрансформатора.

Данная схема была испытана в лаборатории релейной защиты Томского политехнического института. Результаты испытаний получились точно такими же, как и для схемы рис. 2, и поэтому в настоящей работе не приводятся.

Величина напряжений во вторичных цепях защиты

Дифференциальная защита с уравновешенными напряжениями впервые начала применяться для генераторов. Основными затруднениями в конструировании этой защиты являлись чрезмерно высокие напряжения, появляющиеся во вторичных цепях при коротких замыканиях в защищаемой зоне. В целях снижения этих напряжений до величин безопасных для изоляции рекомендуется обмотки трансформаторов тока цепи равновесия напряжений делать с меньшим числом витков и включать между проводами цепи циркуляции быстронасыщающиеся дроссели [1].

Дифференциальная защита, основанная на равновесии напряжений, для генераторов и трансформаторов одинакова по своему принципу. Однако, возможности повышения напряжения в цепях защит этих агрегатов различны.

При применении втулочных или маломощных трансформаторов тока и подобранных параметрах схемы напряжение в цепях дифференциальной защиты трансформатора не может повыситься до опасных значений. Это происходит потому, что при токах, незначительно превосходящих номинальные, сердечники трансформаторов тока насыщаются и дальнейшее повышение тока не приводит к заметному увеличению электродвижущей силы, а только искажает форму ее кривой.

В качестве примера такого явления ниже приведены результаты испытаний дифференциальной защиты, в одно плечо которой был включен маломощный трансформатор тока. Результаты испытаний показали, что резкое повышение напряжения в цепях защиты наблюдалось до значений тока короткого замыкания, примерно равного двукратному номинальному току, причем величина возникающего напряжения не превосходила восьми-десяти вольт. Дальнейшее повышение кратности тока короткого замыкания почти не меняло напряжения в цепях защиты.

Для защиты трансформаторов, выполненной при помощи мощных трансформаторов тока, так же, как и для защиты генераторов, не исключена возможность появления во вторичных цепях напряжений, опасных для изоляции. Однако, применять методы, рекомендуемые для защиты генераторов, в целях снижения напряжений в цепях защиты трансформаторов нецелесообразно по следующим причинам:

1. Неравенство чисел витков вторичных обмоток трансформаторов тока приводит к необходимости наматывать на автотрансформатор дополнительную обмотку для компенсации разности электродвижущих сил в цепи равновесия напряжений. Это значительно усложняет схему и делает ее неудобной в эксплуатации.

2. Включение между проводами цепи циркуляции быстронасыщающихся дросселей приводит к появлению дополнительных намагничивающих токов. Это нарушает условия подбора параметров схемы и может вызвать появление значительных токов небаланса. Роль дросселей, в этом случае, выполняют автотрансформаторы или быстронасыщающиеся трансформаторы.

По указанным причинам особых мер для снижения возникающих напряжений в цепях защиты трансформаторов предусматривать не следует. В случае применения мощных трансформаторов тока целесообразнее повышать изоляцию вторичных цепей.

Экспериментальная проверка теоретических выводов

Для проведения экспериментов были изготовлены 2 трансформатора тока с двумя вторичными обмотками и автотрансформатор. Трансформаторы тока были рассчитаны на номинальное число ампервитков, равное 500, и имели различное сечение железа сердечников. Параметры автотрансформатора подбирались из условия минимума токов небаланса (см. цитированную выше работу автора). Во всех опытах вместо реле включалось активное сопротивление, причем величина последнего подбиралась из условий оптимальной чувствительности защиты при работе трансформаторов тока с максимальным сопротивлением цепей намагничивания.

Сравнение величин тока небаланса для защит с уравновешенными напряжениями и с циркулирующими токами производилось следующим образом: собиралась схема, имитирующая дифференциальную защиту трансформатора с уравновешенными напряжениями, согласно рис. 2. При коротком замыкании вне защищаемой зоны (точка „К₂“ рис. 2) подъемом тока с нуля устанавливались токи определенной кратности по отношению к номинальному току, при этом производились замеры тока небаланса, протекающего в цепи реле.

Затем, при помощи этих же трансформаторов тока и этих же соединительных проводов, собиралась схема, имитирующая дифференциальную защиту трансформатора с циркулирующими токами. Сопротивление цепи реле уменьшалось в четыре раза, и производились замеры, аналогичные предыдущим.

По полученным данным построены кривые зависимости тока небаланса от кратности тока сквозного короткого замыкания, приведенные на рис. 5.

Кривая „а“ рис. 5 показывает зависимость тока небаланса от кратности тока сквозного короткого замыкания для защиты с уравновешенными

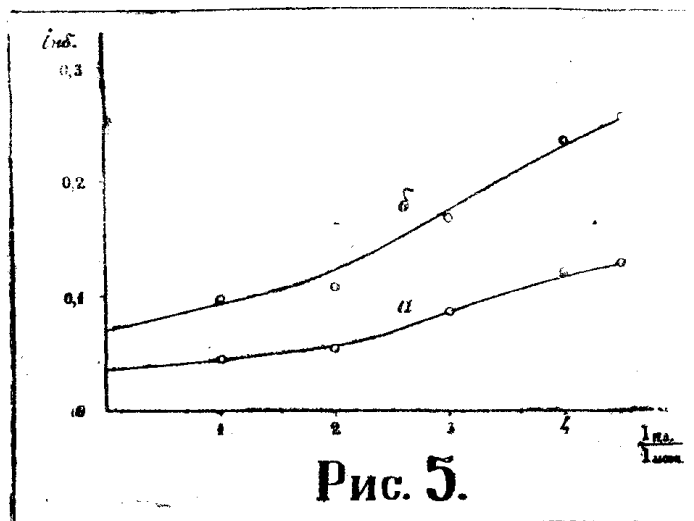


Рис. 5.

напряжениями, а кривая „б“ — аналогичную зависимость для защиты с циркулирующими токами.

Из сравнения приведенных кривых видно, что при подобранных параметрах схемы токи небаланса защиты с уравновешенными напряжениями примерно вдвое меньше токов небаланса в схеме с циркулирующими токами, причем такое соотношение сохраняется при всех режимах работы силового трансформатора. Следовательно, теоретические выводы этой части работы подтвердились опытом.

Следующим вопросом экспериментальной проверки рассматривалась возможность селективной работы защиты с уравновешенными напряжениями при использовании основных трансформаторов тока и автотрансформатора в качестве быстроснабжающегося трансформатора тока. Для этого была собрана схема рис. 2, и в цепь ее циркуляции было введено дополнительное сопротивление, равное 4 омам. Затем производилось включение трансформатора на холостой ход при полном рабочем напряжении, и при пониженном напряжении создавалось искусственное замыкание вне защищаемой зоны, причем величина установившегося тока короткого замыкания соответствовала трехкратному номинальному току. Токи, протекающие в первичной цепи силового трансформатора и в цепи реле, осциллографировались.

Полученные осциллограммы приведены на рис. 6 и 7.

Верхние кривые осциллограммы показывают токи в первичной цепи силового трансформатора, а нижние — токи в цепи реле. Осциллограмма рис. 6 показывает токи при включении силового трансформатора на холостой ход, а осциллограмма рис. 7 — токи при коротком замыкании вне зоны защиты.

Из рассмотрения приведенных осциллограмм видно, что трансформаторы тока, входящие в схему, в достаточной мере отфильтровывают апериодическую составляющую первичного тока и что ток в цепи реле при пе-

реходных процессах в первичной цепи не превосходит значений установившегося тока. Отсюда следует, что соответствующей настройкой схемы можно добиться селективной работы защиты при всех режимах работы силового трансформатора и что теоретические выводы относительно возможности такой настройки верны.

Следующим рассматривался вопрос возможности повышения напряжения в цепях защиты при коротком замыкании в защищаемой зоне. Для этого

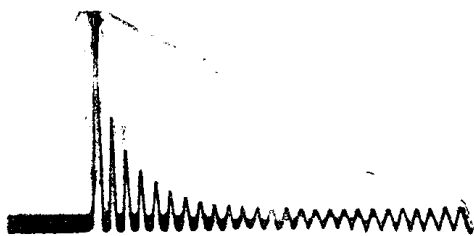


Рис. 6

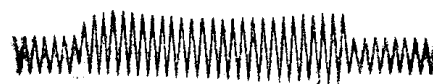


Рис. 7

в зоне защиты, выполненной по схеме рис. 2, ставилась закоротка. Между проводами цепи циркуляции и параллельно реле включались вольтметры. Затем подъемом тока с нуля снимались зависимости напряжений, возни-

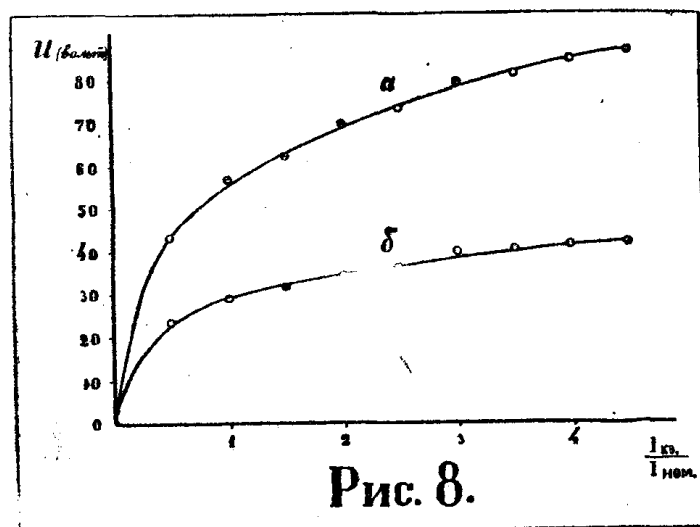


Рис. 8.

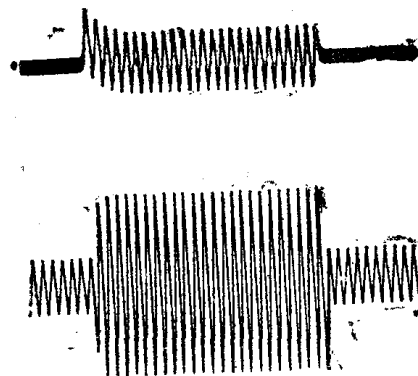


Рис. 9

кающих на клеммах реле и между проводами цепи циркуляции, от кратности первичного тока по отношению к номинальному. Полученные зависимости приведены на рис. 8.

Кривая „а“ рис. 8 показывает напряжение на клеммах реле в зависимости от кратности тока короткого замыкания. Кривая „б“ показывает аналогичную зависимость для напряжения между проводами цепи циркуляции.

Из рассмотренных кривых рис. 8 видно, что резкое возрастание напряжения в цепях защиты происходит при росте тока до значений, при которых сердечники трансформаторов тока насыщаются. При дальнейшем

увеличении тока напряжение почти не возрастает, причем величина возникающего напряжения не опасна для изоляции.

Далее выяснилась возможность повышения напряжения в цепях защиты при переходном процессе короткого замыкания. Для этого при работе трансформатора на холостом ходу производилось внезапное короткое замыкание в зоне защиты. Величина установившегося тока короткого замыкания соответствовала трехкратному номинальному току. Ток в месте короткого замыкания и напряжение, возникающее на зажимах реле, осциллографировались. Полученные осциллограммы приведены на рис. 9.

Верхняя кривая указанного рисунка показывает ток, протекающий в месте короткого замыкания, а нижняя—напряжение на зажимах реле.

Из приведенных осциллограмм видно, что напряжение на клеммах реле в начале переходного процесса имеет величину меньшую, чем при установившемся режиме, следовательно, переходный процесс короткого замыкания не вызывает дополнительного повышения напряжения в цепях защиты и не опасен для изоляции последней.

Выводы!

На основании всех теоретических выкладок и экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Дифференциальная защита, основанная на равновесии напряжений, может быть выполнена для трансформаторов без применения дополнительного оборудования, но с необходимостью намотки на сердечники трансформаторов тока еще одной вторичной обмотки.

2. Применением указанного типа защиты для трансформаторов можно значительно повысить чувствительность и селективность последней.

3. Дифференциальная защита с уравновешенными напряжениями имеет ряд эксплуатационных преимуществ по сравнению с защитой, выполненной по схеме с циркулирующими токами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. В. Зевеке.—Дифференциальная защита электрических машин, журнал „Электрические станции“ № 1, 1940 г.