

## **К ВОПРОСУ О ТИПЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ**

И. Д. КУТЯВИН

(Представлено проф. доктором техн. наук В. К. Щербаковым)

В настоящее время к работе релейной защиты электрических систем предъявляются очень высокие требования в отношении ее чувствительности, избирательности и скорости действия. В связи с этим качество релейных приборов непрерывно повышается, улучшаются и схемы защиты. Однако при разработке современных схем защиты часто возникают затруднения из-за неудовлетворительной работы трансформаторов тока при переходных процессах в первичной цепи.

Дело в том, что рабочим режимом большинства типов релейной защиты является переходный процесс в первичной цепи установки. При этом защита должна точно определить характер и место повреждения и произвести соответствующую операцию. Это возможно в том случае, если схема защиты питается от измерительных трансформаторов, обладающих при этих режимах достаточной точностью или постоянством погрешностей, которые заранее можно учесть.

Используемые в настоящее время трансформаторы тока имеют вполне достаточную точность только при нормальной работе установки. В случае появления в первичной цепи токов короткого замыкания, содержащих апериодическую составляющую, погрешности этих трансформаторов во многих случаях становятся недопустимо большими вследствие сильного насыщения стали сердечника и резкого снижения коэффициента взаимной индукции трансформатора. Это наблюдается особенно в том случае, когда сердечники трансформаторов имеют перед коротким замыканием значительный остаточный магнетизм положительного знака. Кроме того, величина погрешностей трансформаторов тока при коротких замыканиях зависит от кратности тока при этом режиме по отношению к номинальному току трансформатора, а указанная кратность определяется мощностью системы. Чем больше мощность системы, тем больше ток короткого замыкания и тем, следовательно, больше погрешности трансформаторов при коротких замыканиях.

В связи с изложенным возникает необходимость разработки специальных трансформаторов для питания релейной защиты, обладающих различными свойствами в зависимости от типа схем, в которых они применяются. В этом отношении все трансформаторы тока, предназначенные для релейной защиты, необходимо разделить на следующие три категории:

- 1) трансформаторы тока, применяемые для схем защиты от замыкания на землю для сетей с малым током повреждения;
- 2) трансформаторы тока, применяемые для всех видов дифференциальных защит;
- 3) трансформаторы тока, применяемые для всех остальных защит.

К трансформаторам тока первой категории следует отнести все трансформаторы нулевой последовательности, которые в большинстве

своем являются одновитковыми и при замыканиях на землю должны трансформировать в цепь реле небольшие первичные токи (до нескольких десятков ампер) с высокой точностью, поэтому они в настоящее время выполняются с сердечниками из пермаллоя [1] или со стальными сердечниками с дополнительным подмагничиванием [2, 3].

Разработке трансформаторов первой категории в Советском Союзе за последние годы уделялось очень много внимания. В разработке шинных и кабельных трансформаторов этой категории очень много сделали сотрудники Электротехнического института АН УССР под руководством И. М. Сироты [2, 3]. В результате этих работ получены трансформаторы, обеспечивающие возможность устройства высокочувствительной защиты от замыкания на землю самых мощных генераторов.

Трансформаторы тока второй категории используются для выполнения дифференциальных защит, основанных на равновесии вторичных токов или э.д.с. Реле этих защит реагирует на геометрическую разность вторичных токов или на ток, пропорциональный геометрической разности вторичных э.д.с., поэтому рассматриваемые трансформаторы должны отличаться высокой однотипностью при всех режимах работы установки и должны удовлетворять следующим требованиям:

1) трансформаторы должны иметь совпадающие характеристики, представляющие зависимость вторичного тока от первичного  $I_2 = f(I_1)$ ;

2) сердечники трансформаторов не должны удерживать остаточный магнетизм;

3) трансформаторы должны иметь прямолинейную характеристику  $I_2 = f(I_1)$ .

Первые два требования относятся к трансформаторам тока, используемым для выполнения дифференциальных защит генераторов, двухобмоточных трансформаторов, мощных двигателей, параллельных линий и пр.

Особенностью этих защит является то, что при отсутствии повреждения в зоне их действия трансформаторы тока одной и той же фазы обтекаются одинаковым первичным током. Поэтому для снижения тока небаланса этих защит при сквозных сверхтоках необходимо, чтобы трансформаторы каждой фазы имели совпадающие характеристики  $I_2 = f(I_1)$ . Появление остаточного магнетизма в сердечниках может нарушить это условие, так как величина остаточной индукции у разных трансформаторов, включенных в одну и ту же фазу, может быть различна. Вследствие этого ток небаланса при сквозном сверхтоке в течение первых двух-трех полупериодов может быть очень велик и может вызвать неправильную работу защиты.

В дифференциальной защите шин и трехобмоточных силовых трансформаторов трансформаторы тока одной и той же фазы при нормальном режиме работы, а также при сквозных сверхтоках обтекаются разными первичными токами. Если рассматриваемые защиты выполняются при помощи трансформаторов тока с характеристиками произвольной формы, то при указанных условиях эти трансформаторы, включенные в одну и ту же фазу, будут работать на разных точках своих характеристик и поэтому будут иметь различные погрешности, что вызовет появление в реле больших токов небаланса и может привести к неправильной работе защиты. Из этого вытекает, что трансформаторы тока, употребляемые для рассматриваемых защит, должны удовлетворять всем трем указанным требованиям.

Особенностью трансформаторов тока этой группы является также то, что они в большинстве случаев работают с малой вторичной нагрузкой, состоящей из сопротивления проводов цепи циркуляции токов.

Совмещение характеристик  $I_2 = f(I_1)$  можно получить путем подбора трансформаторов тока в заводских условиях, как это и делается в настоящее время.

Влияние остаточного магнетизма трансформаторов тока на работу дифференциальной защиты можно устранить целым рядом способов, к числу которых относятся следующие:

1) применение дифференциальных трансформаторов тока, имеющих две первичные обмотки;

2) повышение рабочей индукции в сердечнике трансформатора до 4—5 кгс, вследствие чего остаточный магнетизм очень быстро размагничивается;

3) применение трансформаторов с подмагничиванием переменным током;

4) применение трансформаторов тока с воздушными сердечниками;

5) применение трансформаторов тока с воздушным зазором в сердечнике.

Дифференциальные трансформаторы тока с двумя первичными обмотками в технике давно известны. Они могут быть использованы только для дифференциальной защиты генераторов и двигателей. Подобные трансформаторы с концентрическими токопроводами были предложены автором в 1935 г. [4] и при исследовании давали настолько малые токи небаланса, что при помощи этих трансформаторов можно было бы обеспечить и защиту генераторов от замыканий на землю. Однако до сих пор эти трансформаторы не освоены нашей промышленностью, несмотря на то что их применение очень упростило и удешевило бы защиту генераторов от внутренних повреждений.

Вопрос повышения рабочей индукции в трансформаторах тока до 4—5 кгс с целью устранения влияния остаточного магнетизма на работу дифференциальной защиты генераторов разрабатывался Б. А. Нечаевым [5], который на основании своих исследований установил, что „кривые намагничивания пары трансформаторов, сердечники которых изготовлены из стали одной марки без специального подбора в комплект, сближаются по мере роста индукции и при предельной индукции совпадают. Поскольку трансформаторы тока с малым объемом железа сохраняют предельные индукции в течение всего переходного процесса, токи небаланса в реле при этом режиме должны оставаться малыми“. Это заключение Б. А. Нечаева должно быть проверено путем опытной эксплуатации защиты с трансформаторами его конструкции, так как трансформаторы с видимым совпадением кривых намагничивания  $B=f(I)$  при больших насыщениях сердечников могут давать очень большие токи небаланса. Это объясняется тем, что при указанных условиях кривые намагничивания становятся почти горизонтальными и тогда, при незаметном несовпадении кривых и при одинаковой индукции, разница в токах намагничивания может быть очень велика.

Вопрос применения трансформаторов тока с подмагничиванием для дифференциальных защит разрабатывается в настоящее время в релейной лаборатории Томского политехнического института.

Трансформаторы тока с воздушными сердечниками впервые были применены в 1942 году для дифференциальной защиты шин, которая при лабораторных испытаниях дала высокую чувствительность, но на практике эта чувствительность оказалась неудовлетворительной из-за недостаточной мощности трансформаторов тока. Большую работу по применению трансформаторов тока с воздушными сердечниками для дифференциальной защиты генераторов и трансформаторов выполнил В. М. Израйльянец [6], который в своих выводах указывает, что применение этих трансформаторов для указанных защит значительно повышает их чувствительность. Однако опытом эксплуатации эти защиты еще не проверены.

Крупным недостатком трансформаторов тока с воздушным сердечником является то, что они получаются громоздкими, имеют очень малень-

кую мощность и подвержены влиянию посторонних магнитных полей, что затрудняет их использование для дифференциальных защит.

Остаточную индукцию в стальном сердечнике трансформатора можно снизить до любого значения применением воздушного зазора необходимой величины. Первые сведения о применении трансформаторов этого типа в США для дифференциальной защиты шин относятся к 1941 году.

Примененные тогда трансформаторы с воздушным зазором имели прямоугольный сердечник с восьмью воздушными зазорами, суммарная длина которых составляла 17% от полной длины средней силовой линии сердечника, в результате чего эквивалентная магнитная проницаемость этой сложной магнитной цепи получилась около шести. Опыт эксплуатации дифференциальной защиты шин с применением рассматриваемых трансформаторов не был опубликован.

По идее устройства трансформаторы тока с воздушным зазором должны иметь прямолинейную характеристику  $I_2 = f(I_1)$  и не должны удерживать значительный остаточный магнетизм. В то же время они будут иметь значительно большую мощность, чем трансформаторы с воздушными сердечниками.

Как показали исследования автора, эти трансформаторы снижают остаточную индукцию до величины рабочей при воздушном зазоре, равном 0,1—0,2 процента от общей длины средней силовой линии сердечника. Если при этом индукция в сердечнике при наибольших токах короткого замыкания не будет превышать 7—8 кГс, то характеристика  $I_2 = f(I_1)$  будет прямолинейной.

Для дифференциальных защит, контролирующих только два тока (защита генераторов, двухобмоточных трансформаторов и др.), величина зазора в сердечнике должна быть выбрана, исходя из устранения влияния остаточного магнетизма на работу этих защит, и не будет превышать 0,1—0,2 процента от общей длины силовой линии. Индукция в сердечниках трансформаторов этих защит при сквозных коротких замыканиях может не ограничиваться, так как требование прямолинейности их характеристик здесь необязательно.

Трансформаторы тока этого типа, используемые для дифференциальных защит, контролирующих свыше двух токов (защита шин, трехобмоточных трансформаторов и др.), должны иметь прямолинейные характеристики  $I_2 = f(I_1)$ , поэтому их индукция при наибольшем сквозном токе короткого замыкания не должна выходить за пределы 7—8 кГс. Воздушный зазор для этих трансформаторов должен быть порядка 3—5% от длины средней силовой линии в зависимости от максимальной величины первичного тока короткого замыкания.

Трансформаторы тока третьей категории, предназначенные для питания дистанционных защит, максимальных токовых и токовых направленных отсечек и некоторых других, должны обладать достаточной точностью при коротких замыканиях в защищаемой линии. Большие погрешности применяемых в настоящее время трансформаторов при токах короткого замыкания, имеющих значительную аperiодическую составляющую, приводят к отказу в работе отсечек и сокращают первую зону дистанционных защит. В связи с этим для питания указанных выше защит желательно применять также трансформаторы тока с воздушным зазором, которые могут обеспечивать достаточную точность при любых наиболее тяжелых коротких замыканиях. Следует отметить, что специальные трансформаторы тока для этих защит до сих пор не разрабатывались, несмотря на то, что необходимость в них признается многими.

В заключение необходимо сделать следующие выводы:

1. Дифференциальные трансформаторы тока и трансформаторы с повышенной рабочей индукцией могут применяться только для дифферен-

циальной защиты генераторов, причем первые из них способны обеспечить наиболее высокое качество указанной защиты.

2. Трансформаторы с воздушным сердечником едва ли получат широкое распространение вследствие указанных выше присущих им недостатков.

3. Трансформаторы с воздушным зазором являются универсальными. Как показали исследования автора, эти трансформаторы при высоком классе точности будут иметь достаточную мощность для питания всех типов релейной защиты. При этом они не подвержены влиянию остаточного магнетизма и при индукциях до 7—8 кгс имеют прямолинейную характеристику  $I_2 = f(I_1)$ . Поэтому данные трансформаторы с успехом могут применяться для всех видов дифференциальных, а также и для многих линейных защит.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гельфанд Я. С. и др. Чувствительные токовые защиты от замыканий на землю и опыт их эксплуатации. Электрические станции, 11, 1951.

2. Сирота М. И. Проверка новой защиты генераторов от замыкания на землю. Электрические станции, 6, 1949.

3. Сирота М. И. Защита генераторов от замыкания на землю с шинными трансформаторами тока нулевой последовательности. Электрические станции, 12, 1950.

4. Кутявин И. Д. Защита генераторов от внутренних повреждений. Электричество, 12, 1936.

5. Нечаев Б. А. К вопросу о применении трансформаторов тока с малым объемом железа для дифференциальных защит генераторов. Автореферат диссертации. Иваново, 1952.

6. Изральянц В. М. Воздушные трансформаторы тока в схемах дифференциальной защиты генераторов и трансформаторов. Автореферат диссертации. Ленинград, 1952.