

в зависимости от жесткости упругого основания, геометрических и механических параметров слоев стержня.

Таким образом, полученные решения позволяют описывать напряженно-деформированное состояние упругого трехслойного стержня с жестким наполнителем, покоящимся на упругом основании, при действии локальных поверхностных нагрузок и сосредоточенных сил.

Литература

1. Яровая А. В., Старовойтов С. А. Трехслойный стрежень на упругом основании // Материалы, технологии, инструменты.– 2003.– Т. 8, № 2.– С. 9–11.
2. Старовойтов С. А. Напряженно-деформированное состояние трехслойного стержня на упругом основании // Вестник БелГУТа.– 2004.– № 1(8).– С. 25–28.
3. Старовойтов С. А. Моделирование поведения трехслойного стержня на упругом основании // Сборник трудов молодых ученых Национальной академии наук Беларуси.– 2004.– Т. 4.– С. 134–137.

О ПРИНЦИПАХ ВЫПОЛНЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА

Томкевич А. П., БНТУ, Минск

Существующие дифференциальные защиты трансформаторов анализируют разность приведенных токов со стороны высшего и низшего напряжений и в случае превышения величины уставки, обусловленной различного рода небалансами, выдают сигнал на отключение трансформатора. Традиционно выполняется общая защита для всех обмоток, требующая учета схем соединения обмоток, отстройки от аномальных режимов и работы устройства РПН, что приводит к увеличению тока срабатывания. Такой подход позволяет независимо решать вопросы проектирования трансформатора и его релейной защиты.

Теоретически возможна реализация дифференциальной защиты индивидуально для каждой из обмоток. Это техническое решение требует изменений в конструкции трансформатора – установку дополнительных трансформаторов тока (ТТ), а также большего числа измерительных органов, что приводит к его экономической неэффективности.

Основным аномальным режимом, обуславливающим значительный коэффициент отстройки при расчете тока срабатывания, является бросок тока намагничивания (БТН), возникающий при включении трансформатора или при устранении внешнего короткого замыкания и превышающий номинальный ток трансформатора ($I_{ном}$) в 6 – 8 раз [1].

Разработанные способы отстройки от БТН и сверхтоков внешних КЗ [1, 2] с использованием быстронасыщающихся трансформаторов (реле РНТ-56х) и торможением от токов плеч (реле ДЗТ-11) обеспечивают ток срабатывания защиты порядка $(1 - 1.2) I_{ном}$. В случае применения реле, дополнительно реализующих принципы распознавания сигналов (ДЗТ-21 или устройства ЯРЭ-2201 на микроэлектронной базе), удается достичь тока срабатывания в пределах $(0.3 - 0.7) I_{ном}$.

В современных цифровых защитах трансформаторов получило развитие второе направление. Фактически переход на новую элементную базу позволил адаптивно выбирать плечо торможения, улучшить характеристики фильтрации сигнала и осуществлять контроль по следующим критериям: процентное содержание второй гармоники в пер-

вичном токе и характерной форме кривой тока при БТН, что привело к снижению тока срабатывания защиты до $(0.15 - 0.4) I_{ном}$. Как и предшественники, цифровые защиты не всегда реагируют на витковые замыкания обмоток – для ликвидации таких режимов предусмотрена газовая защита. Нечувствительность к таким повреждениям обусловлена использованием дифференциальной защиты с торможением токами плеч (87Т). Цифровая защита (например, Т60, RET-316, Р631), выполненная на этом принципе, способна уверенно защищать лишь $(70 - 75)\%$ обмотки, соединенной в звезду, считая от ввода [3]. Вопрос защиты оставшейся части обмотки ведущие фирмы-производители решают по-разному. В частности, компания GE предлагает использовать специальную дифференциальную защиту от замыканий на землю, включаемую на токи нулевой последовательности. Добиться удовлетворительной чувствительности к витковым замыканиям удалось лишь для определенного вида повышающих трансформаторов [2].

В настоящее время основными задачами исследований в области совершенствования дифференциальных защит трансформатора являются уменьшение тока срабатывания защиты до величин $(0.03 - 0.1) I_{ном}$ и обеспечение 100%-ной защитоспособности объекта.

Цифровая элементная база открывает перед разработчиками новые возможности – использование математических моделей не только для исследований режимов работы оборудования, но и для построения на их базе непосредственно устройств релейной защиты. Это преимущество уже используется для реализации тепловых защит двигателей, генераторов, трансформаторов и др. оборудования. Решение тепловой модели объекта позволяет отказаться от применения тепловых датчиков, контролировать температуру в труднодоступных местах. Используемые математические модели характеризуются относительной простотой, а существенная инертность процессов позволяет не учитывать влияние импульсных помех и не требует значительных вычислений.

Разрабатываемый алгоритм функционирования устройства релейной защиты трансформатора от внутренних повреждений, выполненного на основе математической модели, сохраняет дифференциальный принцип. Основопологающим отличием от существующих защит является сравнение (вычитание) трансформированных реальных первичных токов и вычисленных «модельных» токов трансформатора. Такой подход не требует отстройки от аномальных режимов, т. к. они воспроизводятся математической моделью.

Ключевые задачи, возникающие при реализации описанной защиты, состоят в следующем: модель трансформатора должна гарантированно решаться в реальном времени (за $(0.2 - 0.5)$ мс) и содержать в себе наименьшую погрешность; необходимость использования моделей ТТ, позволяющих уточнить вторичные токи ТТ при их насыщении; необходимость использования цепей напряжения для получения сведений о текущем режиме энергосистемы (исходные данные для модели трансформатора); наличие адекватных и простых аппроксимаций кривых намагничивания, а также конструктивных параметров силового трансформатора и трансформаторов тока.

Литература

1. Федосеев А. М., Федосеев М. А. Релейная защита электроэнергетических систем. –М.: Энергоатомиздат, 1992. –528 с.: ил.
2. Засыпкин А. С. Релейная защита трансформаторов. –М.: Энергоатомиздат, 1989. –240 с.
3. Инструкция по эксплуатации защиты трансформатора Т60. Версия 4.8.