



PS1 – S3-05



Функционирование и конструкция релейной защиты для мониторинга состояния трансформатора

Т. ЙИП, Г. ЛЛОЙД, Ш. ХОСЕЙНИ, М. МОСКОСО, К. ЛИУ
ALSTOM Grid
Великобритания
graeme.lloyd@alstom.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Мониторинг состояния трансформатора, защита.

1 ВВЕДЕНИЕ

Силовые трансформаторы являются критическим звеном в схемах передачи электроэнергии переменного тока от электростанций до конечных потребителей. С точки зрения общего объема инвестиций, энергосистемы тратят на трансформаторы по крайней мере столько же, сколько они тратят на оборудование электростанций. Предполагается, что трансформаторы должны работать 20 - 30 лет, и во многих случаях, еще дольше.

Применение систем мониторинга состояния трансформатора позволяет получить выгоду от более рентабельного использования оборудования, обнаруживая неисправности, которые могут быть установлены прежде, чем смогут нанести непоправимый ущерб, а также в диагностировании неисправностей и определении, возможно ли работать с такими неисправностями, возможно ли их устранить или необходимо заменить трансформатор.

Перегрузка силовых трансформаторов выше заявленных производителем значений, может вызвать повышение температуры масла и обмоток. Если температура обмоток трансформатора превысит допустимые значения, то изоляция будет ухудшаться и возможно преждевременно разрушится. Длительный нагрев в течение долгого времени ослабляет прочность изоляции, приводя к ускоренному выходу из строя трансформатора. Протекание токов КЗ создают силы внутри трансформатора, которые могут в конечном счете ослабить целостность обмоток. Перевозбуждение трансформатора вызывает нагревание трансформатора и увеличивает ток возбуждения, шум, и вибрацию.

Всесторонняя схема защиты трансформатора наряду с защитой от внутренних повреждений, должна включать защиту от перегрузки трансформатора, протекания сквозных токов КЗ и перевозбуждения.

К измеряемым показателям эксплуатационной надежности трансформатора относят электрическую нагрузку; температуру верхних слоев масла, температуру наиболее горячей точки обмотки и окружающей среды; историю повреждений; и измерение возбуждения. Системы, которые используют эти показатели, могут принять обоснованные решения и запланировать оптимальную нагрузку трансформатора и обслуживание. Также, устройство с гибкими коммуникационными возможностями может легко интегрироваться в систему управления потребителя.

Хотя системы мониторинга трансформатора присутствуют на рынке в течение нескольких лет и добились успеха в обнаружении и диагностировании проблем, их использование далеко не универсально. К основным барьерам для более широкого применения систем мониторинга состояния трансформатора относят высокую стоимость установки и

обслуживания, несовместимость между системами и трансформаторами различных производителей и трудностью сбора данных от разнообразных систем.

Включение функций мониторинга состояния трансформатора в стандартное реле защиты уменьшает барьеры в стоимости таких систем. Кроме того, гибкость и стандартизация каналов связи реле защиты позволяют облегчить сбор данных и взаимодействие с существующими SCADA системами заказчика.

Эта статья описывает устройство и функционирование реле защиты трансформатора, которое включает многие особенности систем мониторинга состояния трансформатора, позволяющие сделать мониторинг состояния экономически оправданным решением.

2 УСТРОЙСТВО РЕЛЕ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Было разработано комплексное реле защиты трансформатора для защиты двух и трехобмоточного трансформатора (включая автотрансформаторы), с подключением до 5-ти трехфазных групп ТТ и 4-х входов напряжения. Реле содержит защиту от перегрузки трансформатора, сквозных токов КЗ и перевозбуждения, наряду со стандартными функциями защиты, такие как дифференциальная защита трансформатора, МТЗ и ТЗНП и т.д. от внутренних повреждений.

Реле использует набор измеряемых показателей эксплуатационной надежности трансформатора, контролирующих электрическую нагрузку; температуру верхних слоев масла, температуру наиболее горячей точки обмотки и окружающей среды; историю повреждений; и измеренное возбуждение. Системы, которые используют эти показатели, могут принять обоснованные решения и запланировать оптимальную нагрузку трансформатора и обслуживание.

Реле защиты включает многие аспекты систем мониторинга состояния трансформатора, указанные ниже и описанные более подробно в следующих главах статьи:

- Температура верхнего слоя масла и наиболее нагретой точки обмотки, вычисленные с помощью данных о температуре окружающей температуры, изменении нагрузки и температурных параметров масла, на основе стандарта IEEE C57.91-1995 [2]
- Вычисление снижения ресурса изоляции на основе стандарта IEEE C57.91-1995 [2] предоставляя данные о накопленном снижении ресурса изоляции, скорости снижения ресурса изоляции, коэффициенте старения изоляции и оставшемся сроке службы
- Мониторинг протекания токов КЗ, основанный на I^2t вычислении максимального тока КЗ и длительности повреждения в каждой фазе
- Мониторинг температуры, например верхних и нижних слоев масла, входной/выходной температуры охладителей масла, масла в баке РПН и температуры нагретой точки обмотки через десять входов RTD реле или четыре входные токовые петли (CLIO)
- Мониторинг и сигнализация от остальных датчиков, таких как положение РПН, уровень масла, давление масла во вводах через входные токовые петли реле
- Мониторинг нагрузочного тока и тока КЗ, а также напряжения через входные трансформаторы тока и напряжения реле. Реле может также обеспечить контроль ТТ и ТН.

Реле поддерживает промышленные стандарты связи для подключения реле защиты и функций мониторинга состояния к SCADA системе заказчика. Например, реле поддерживает различные стандартные протоколы, такие как MODBUS, IEC60870-5-103, DNP 3.0 и IEC61850. Задний порт связи опционально может поддерживать RS485, оптическое волокно, Ethernet или резервированный Ethernet плюс передний порт связи для местного доступа.

Реле также содержит программируемые светодиоды для удобства локальной индикации и программируемую логику для упрощения наладки конфигурации. Также присутствуют такие функции, как список событий и осциллограф, что может помочь при диагностике повреждений и тревог.

Как описано выше, реле включает четыре преобразовательных (токовая петля) входа с различными диапазонами 0-1mA, 0-10mA, 0-20mA или 4-20mA, которые могут использоваться со многими внешними контрольными датчиками для отображения температуры, уровня масла и т.д. Для каждого входа имеется две ступени защиты с выдержкой времени, одна для

сигнализации, другая для отключения. Каждая ступень может работать при повышении или понижении контролируемой величины. Четыре выходные токовые петли также обеспечивают диапазоны 0-1mA, 0-10mA, 0-20mA или 4-20mA, которые могут облегчить подбор отдельных преобразователей. Они могут использоваться для подключения к подвижной катушке стандартных амперметров для аналоговой индикации измеренных величин или подключения в SCADA, используя существующий аналог RTU. Для подключения сигналов о положении внешних устройств, таких как выключатели или внешние датчики доступны до 24 цифровых входов, и до 24 выходных контактов для организации сигнальных и отключающих выходных команд.

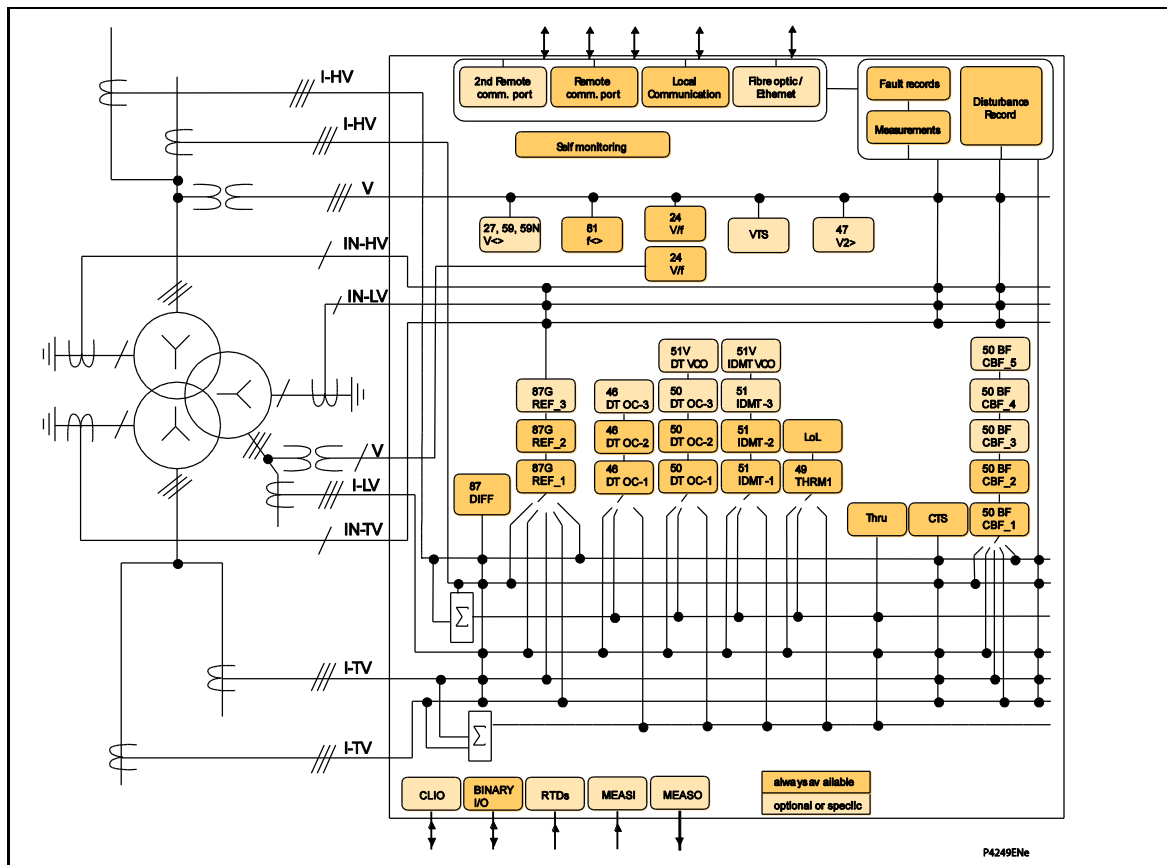


Рис. 1: Функциональная диаграмма органов защиты и мониторинга состояния трансформатора

3 ОСНОВЫ ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ ТРАНСФОРМАТОРА

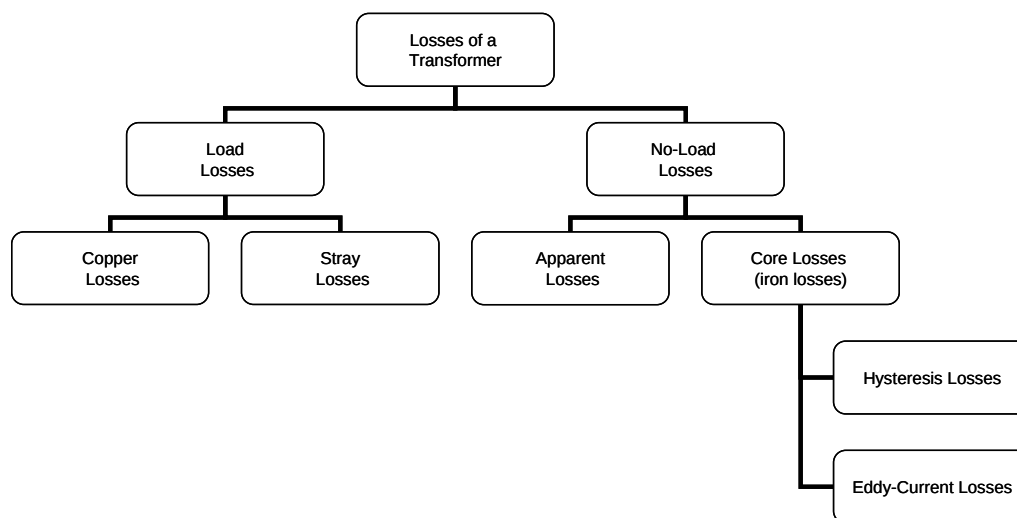
Факторами, которые влияют на тепловые характеристики трансформатора и генерируют тепло, которое вызывает повышение температуры, являются главным образом Потери в магнитопроводе и Активные потери в проводнике (обычно называемые Потери в меди, то есть I^2R потери). Потери в трансформаторе показаны на рис. 2.

Номинальные данные трансформатора обычно зависят от *максимальной разрешенной рабочей температуры* изоляции трансформатора [1]. Когда потери уравновешены системой охлаждения трансформатора, конвекцией и теплопроводностью, значение температуры достигается установившегося значения. Величина потерь увеличивается при увеличении мощности, поэтому номинальные данные трансформатора основаны на величине потерь, при которой достигается максимально допустимая температура T_p . Допустимое увеличение температуры θ_p также зависит от температуры окружающего воздуха T_a :

$$\text{Максимальное увеличение температуры } \theta_p = T_p - T_a$$

Во время включения, пусковой ток трансформатора является причиной длительной перегрузки трансформатора вплоть до достижения температуры T_p . Пусковой ток превышает

значение номинального тока (до $10xI_n$), но переходное время достаточно мало, чтобы превысить величину θ_p .



P4318ENa

Рис. 2: Потери в трансформаторе

4 ФУНКЦИЯ МОНИТОРИНГА И ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕГРУЗКИ

Функционирование защиты от тепловой перегрузки основано на Стандарте IEEE C57.91-1995 [2]. Функция тепловой перегрузки использует температуру наиболее нагретой точки обмотки Θ_H или температуру верхних слоев масла Θ_{TO} , каждую со своими собственными уставками постоянной времени. Температура верхних слоев масла может быть вычислена или измерена непосредственно с помощью входной токовой петли или входа RTD. Температура наиболее нагретой точки обмотки возможно только вычислить. Окружающая температура Θ_A может быть измерена непосредственно, или среднее ее значение может быть выставлено пользователем (среднее значение окружающей температуры за 24 часа). Так как нагрузка трансформатора является нелинейной, для определения наиболее нагретой точки обмотки используется среднеквадратическое значение тока. В качестве объекта наблюдения может быть выбрана либо обмотка ВН (НН или СН), либо тормозной ток. Рекомендуется выбирать тормозной ток, так как в этом случае возможно выполнить полный тепловой контроль состояния трансформатора.

Тормозной ток, используемый органом тепловой защиты, не является тем же самым тормозным током, используемым дифференциальной защитой. Для вычисления тормозного тока, тепловой орган рассматривает максимальный среднеквадратический фазный ток каждой обмотки трансформатора. Тепловой тормозной ток вычисляется следующим образом.

$$I_{bias} = \frac{MaxHVI_{rms} + MaxLVI_{rms} + MaxTVI_{rms}}{2}$$

В реле реализованы до трех ступеней функции контроля температуры наиболее нагретой точки обмотки и до трех ступеней функции контроля температуры верхних слоев масла. Отключающий сигнал функции контроля температуры верхних слоев масла генерируется при достижении температурой верхних слоев масла (измеренной или вычисленной) значения выше уставки и после истечения выдержки времени. Также, сигнал отключения от функции контроля наиболее нагретой точки обмотки генерируется при достижении температурой наиболее нагретой точки обмотки (только вычисленной) значения выше уставки и после истечения выдержки времени.

Если необходимо более точная информация о температуре трансформатора, то в качестве входов для контроля температуры рекомендуется использовать RTD входы или входные

токовые петли (CLI). Кроме того, при кратковременных перегрузках, применение RTDs/CLI может обеспечить улучшение функционирования максимальной токовой защиты.

4.1 Температура верхних слоев масла

Если температуру верхних слоев масла невозможно измерить, то ее можно вычислить за каждый цикл по следующей формуле:

$$\Theta_{TO} = \Theta_A + \Delta\Theta_{TO}$$

Θ_{TO} = Температура верхних слоев масла

Θ_A = Окружающая температура

$\Delta\Theta_{TO}$ = Превышение температуры верхних слоев масла над окружающей температурой, обусловленное ступенчатым изменением нагрузки

Θ_A может быть получено непосредственным измерением или может быть установлено пользователем через ИЧМ.

4.2 Температура наиболее нагретой точки обмотки

Температура наиболее нагретой точки обмотки может быть получена только путем вычисления. Для ее вычисления за каждый цикл используется следующее выражение:

$$\Theta_H = \Theta_{TO} + \Delta\Theta_H$$

где:

Θ_H = Температура обмотки

Θ_{TO} = Температура верхних слоев масла

$\Delta\Theta_H$ = Превышение температуры обмотки над температурой верхних слоев масла.

4.3 Режимы охлаждения

В реле доступны четыре режима охлаждения - **Естественный, Принудительное охлаждение воздуха, Принудительное охлаждение масла, Принудительное охлаждение воздуха и масла**. Показатели масла и обмотки могут быть выставлены независимо для каждого режима. Эти показатели получают опытным путем и необходимы для вычисления изменения $\Delta\Theta_H$ и $\Delta\Theta_{TO}$, а также для приблизительной оценки изменений в сопротивлении и вязкости при изменении нагрузки.

Выбор режима охлаждения в реле может быть сделан используя цифровые входы или ручную. Цифровые входы позволяют изменять тепловую характеристику в соответствии с режимом охлаждения при включении/отключении вентиляторов и насосов.

5 СТАТИСТИКА СНИЖЕНИЯ РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ

Как заявлено в Стандарте IEEE. C57.91-1995 [2], старение изоляции – временная функция от температуры, влажности и содержания кислорода. Благодаря современным системам производства масла, такие параметры как влажность и содержание кислорода незначительно влияют на старение изоляции. Поэтому, температура – основная причина старения изоляции. Температурное распределение в изоляции не однородно; поэтому часть с самой высокой температурой подвергается большему повреждению. Вследствие этого, при расчете снижения ресурса изоляции, рассматривают температуру наиболее нагретой точки обмотки.

Как описано в Стандарте IEEE. C57.91-1995 коэффициент старения изоляции – это величина ускорения старения изоляции трансформатора при данной температуре наиболее нагретой точки обмотки, по сравнению с уровнем старения изоляции при опорной температуре наиболее нагретой точки обмотки. При повышении средней температуры обмотки трансформатора до 65°C, опорная температура наиболее нагретой точки равна 110°C. При повышении средней температуры обмотки трансформатора до 55°C, опорная температура наиболее нагретой точки равна 95°C. При превышении температуры наиболее нагретой точки

выше опорной температуры, коэффициент старения изоляции будет больше чем 1. При снижении температуры наиболее нагретой точки ниже опорной температуры наиболее нагретой точки, коэффициент старения изоляции будет меньше чем 1.

Реле содержит одну сигнальную ступень с независимой выдержкой времени, основанную на вычислении коэффициента старения изоляции (FAA) и коэффициента снижения ресурса изоляции (LOL). Также возможно просмотреть данные о Накопленном снижении ресурса изоляции (LOL) в часах, Оставшемся сроке службы в соответствии с температурой наиболее нагретой точки обмотки, Коэффициенте снижения ресурса изоляции (ROLOL) в %, Коэффициенте старения изоляции (FAA), Среднем значении коэффициента старения изоляции (FAA, m), и Оставшемся сроке службы в часах FAA, м. ($L_{res}(FAA, m)$).

Модель использует статистику снижения ресурса изоляции, основанную на вычислении *Снижения ресурса изоляции* LOL и *Коэффициента старения изоляции* F_{AA} как показано далее:

Снижение ресурса изоляции рассчитывается каждый час в соответствии с формулой:

$$LOL = L(\Theta_{H,r}) - L_{res}(\Theta_{H,r})$$

где:

$L(\Theta_{H,r})$ = срок службы при опорной температуре наиболее нагретой точки обмотки. Этот параметр выставляется пользователем.

$L_{res}(\Theta_{H,r})$ = оставшееся время службы при опорной температуре наиболее нагретой точки обмотки.

Коэффициент старения изоляции F_{AA} для каждого интервала времени Δt рассчитывается в соответствии с формулой:

$$F_{AA} = \frac{L(\Theta_{H,r})}{L(\Theta_H)} = \frac{e^{\left[A + \frac{B}{\Theta_{H,r} + 273}\right]}}{e^{\left[A + \frac{B}{\Theta_H + 273}\right]}} = e^{\left[\frac{B}{\Theta_{H,r} + 273} - \frac{B}{\Theta_H + 273}\right]}$$

где:

$L(\Theta_H)$ = срок службы при температуре наиболее нагретой точки обмотки.

Θ_H = температура наиболее нагретой точки, вычисленная функцией тепловой перегрузки.

$\Theta_{H,r}$ = температура наиболее нагретой точки при номинальной нагрузке.

B = постоянная кривой продолжительности службы. Этот параметр выставляется пользователем. Стандарт IEEE C57.91-1995 [2] рекомендует принимать значение B равное 15000.

Оставшийся срок службы при опорной температуре наиболее нагретой точки обновляется каждый час по следующей формуле:

$$L_{res}(\Theta_{H,r}) = L_{res,p}(\Theta_{H,r}) - \frac{\sum_{i=1}^{3600} F_{AA,i}(\Theta_H)}{3600}$$

где:

$L_{res,p}(\Theta_{H,r})$ = оставшийся срок службы при опорной температуре час назад

$F_{AA,i}(\Theta_H)$ = значение коэффициента старения изоляции, как рассчитывалось выше. Он рассчитывается каждую секунду.

Значение накопленного снижения ресурса изоляции (LOL) обновляется в энергонезависимой памяти каждый час. Существует возможность сбросить и установить новые значение снижения ресурса изоляции в случае, когда реле используется на другом объекте.

Суточный коэффициент снижения ресурса изоляции (ROLOL) в процентах за каждый день получается следующим образом, и обновляется ежедневно:

$$ROLOL = \frac{24}{L(\Theta_{H,r})} \cdot F_{AA,m}(\Theta_H) \cdot 100\%$$

Среднее значение коэффициента старения изоляции $F_{AA,m}$ обновляется каждый день и вычисляется как:

$$F_{AA,m} = \frac{\sum_{n=1}^N F_{AA,n} \cdot \Delta t_n}{\sum_{n=1}^N \Delta t_n} = \frac{\sum_{n=1}^N F_{AA,n}}{N}$$

где:

$F_{AA,n}$ вычисляется каждый цикл

$\Delta t_n = 1$ цикл

Уровень $F_{AA,m}$ - статистика F_{AA} за последний день. При первом включении реле $F_{AA,m}$ по умолчанию равно 1.

Оставшийся срок службы в часах $F_{AA,m}$ обновляется ежедневно и вычисляется как:

$$L_{res}(F_{AA,m}) = \frac{L_{res}(\Theta_{H,r})}{F_{AA,m}}$$

6 МОНИТОРИНГ СКВОЗНЫХ ТОКОВ КЗ

Согласно статистике [3], сквозные токи КЗ являются главными виновниками неисправностей трансформатора и согласно Стандарта IEEE. C57.109-1993 [4] механические воздействия являются более существенными, чем тепловые воздействия при протекании токов КЗ амплитудой, близкой к допустимым значениям для трансформатора. Однако, при протекании токов КЗ амплитудой близкой к диапазону перегрузки, механические воздействия не столь существенны, если частота замыканий не высока. Ниже рисунок 3 иллюстрирует пример протекания сквозных токов КЗ.

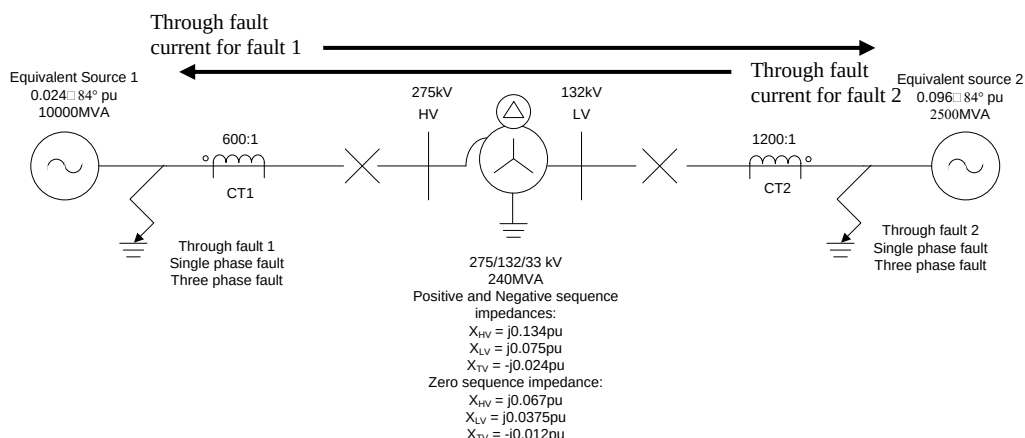


Рис. 3: Пример мониторинга сквозных токов КЗ

С увеличением тяжести внешних повреждений повышается степень их воздействия на трансформатор. Стандарт IEEE. C57.12 [5] описывает нормативы по стойкости трансформаторов к коротким замыканиям. Стандарт заявляет, что трансформатор должен выдерживать замыкания в болтовых соединениях трансформатора в течение 2-х секунд.

В схеме реле орган мониторинга сквозных токов КЗ может контролировать обмотки ВН, НН или СН. В трехобмоточных трансформаторах, должна контролироваться обмотка, через которую во время КЗ протекает наибольший ток. Функция мониторинга сквозных токов КЗ регистрирует уровень тока КЗ, длительность замыкания и дату-время для каждого повреждения. Вычисление I^2t , основанное на зарегистрированном значении длительности максимального тока, выполняется для каждой фазы. Это вычисление выполняется только в том случае, если ток был выше уставки, и не было старта дифференциальной защиты. Вычисления для каждой фазы доступны для просмотра с ИЧМ, поэтому пользователь может запланировать обслуживание трансформатора, основываясь на этих данных. Это может также быть основанием для изменения участка сети с целью уменьшения уровня токов КЗ.

Мониторинг протекания токов замыкания имеет одну сигнальную ступень. Если максимальный совокупный I^2t в трех фазах превышает соответствующую уставку, то генерируется аварийный сигнал. Запись внешнего замыкания начнется, если в одной из фаз протекает ток выше уставки. Эта уставка должна быть выше чем перегрузочная способность трансформатора. Согласно Стандарта IEEE. C57.109-1993 [4], значения протекающего тока от 3.5 крат или менее номинального базового тока является скорее результатом перегрузки, а не замыкания. Стандарт IEEE. C57.91-1995 [2], описывает, что рекомендуемый предел нагрузки выше номинальных параметров для распределительных трансформаторов с повышением температуры до 65°C составляет 300 % номинальной нагрузки в течение короткого промежутка времени (0.5 часа или меньше). С другой стороны, рекомендуемый предел нагрузки выше номинальных данных силового трансформатора с повышением температуры до 55°C является максимум 200%.

7 ФУНКЦИЯ МОНИТОРИНГА И ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕВОЗБУЖДЕНИЯ

Магнитный поток в сердечнике трансформатора прямо пропорционален приложенному напряжению и обратно пропорционален частоте. Перенапряжение и/или случаи снижения частоты могут привести к насыщению сердечника трансформатора. Это может стать причиной возникновения магнитного потока рассеяния в нешихтованных элементах, которые не были предназначены для протекания потока. Получающиеся вихревые токи в твердых элементах (болты и зажимы сердечника) и краях шихтованного сердечника могут вызвать быстрый перегрев и повреждение. Эти ненормальные эксплуатационные режимы могут возникнуть на любом участке энергосистемы, таким образом, любой трансформатор может быть подвержен перевозбуждению. В случае сильного возбуждения, трансформатор должен быть отключен, чтобы избежать его повреждения.

Для защиты и сигнализации при перевозбуждении, реле содержит три ступени с независимой выдержкой времени и одну ступень с независимой/IDMT выдержкой времени плюс одну сигнальную ступень, которая может быть объединена для создания многоступенчатой V/Hz защиты с помощью программируемой логики. Необходимо уведомить производителя при необходимости использования такой логики.

В случае отсутствия стабилизации, переходные режимы перевозбуждения могут вызвать нежелательную работу дифференциальной защиты трансформатора. Перевозбуждение силового трансформатора – типичный случай насыщения сердечника, когда генерируются нечетные гармоники в токе возбуждения. Третья гармоника является самой подходящей для того, чтобы обнаружить режим перевозбуждения, но соединение ТТ в «треугольник» отфильтровывает эту гармонику. Поэтому пятая гармоника является надежным параметром для обнаружения условий перевозбуждения.

Реле фильтрует дифференциальный ток и определяет составляющие основной частоты и пятой гармоники. Если отношение (5-ой гармоники)/(основной гармоники) превышает значение уставки по крайней мере в одной фазе в двух последовательных вычислениях, и если дифференциальный ток больше чем 0.1 рн, дифференциальная защита блокируется в этой фазе.

Орган обнаружения 5-ой гармоники может также использоваться для сигнализации при устойчивом перевозбуждении, которое может быть вызвано геомагнитными возмущениями, что не может быть обнаружено обычными защитами от перевозбуждения.

8 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение систем мониторинга состояния трансформатора позволяет получить выгоду от более рентабельного использования оборудования, обнаруживая неисправности, которые могут быть установлены прежде, чем смогут нанести непоправимый ущерб, а также в диагностировании неисправностей и определении, возможно ли работать с такими неисправностями, возможно ли их устранить или необходимо заменить трансформатор. Хотя системы мониторинга трансформатора присутствуют на рынке в течение нескольких лет и добились успеха в обнаружении и диагностировании проблем, их использование далеко не универсально. К основным барьерам для более широкого применения систем мониторинга состояния трансформатора относят высокую стоимость установки и обслуживания,

несовместимость между системами и трансформаторами различных производителей и трудностью сбора данных от разнообразных систем.

Эта статья описывает устройство и функционирование реле защиты трансформатора, которое включает многие особенности систем мониторинга состояния трансформатора, позволяющие сделать мониторинг состояния экономически оправданным решением.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Power Transformers Rated in Excess of 100 MVA (65°C Winding Rise), IEEE Std. C57.115-1991.
- [2] IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers, IEEE Std C57.91-1995.
- [3] W. H. Bartley, “An Analysis of Transformer Failures—1988 through 1997,” The Locomotive, Hartford Steam Boiler Inspection and Insurance Company.
- [4] Guide for Liquid-Immersed Transformer Through-Fault-Current Duration, IEEE Std C57.109-1993 (R2008).
- [5] IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, IEEE Std. C57.12.00-1993.
- [6] CIGRE Technical Brochure Ref. 343, Recommendations for Condition Monitoring and Condition Assessment Facilities for Transformers, Working Group A2.27, April 2008.