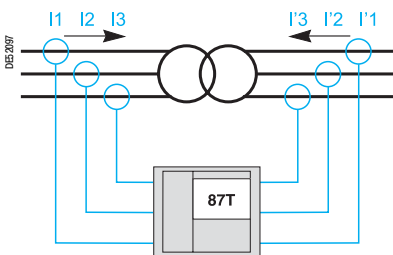


Защита трансформаторов от межфазных коротких замыканий, возникающих в двухобмоточных трансформаторах и блоках "трансформатор – электрическая машина".

Работа

Защищаемая зона расположена между датчиками токов I1, I2, I3, с одной стороны, и датчиками токов I'1, I'2, I'3, с другой стороны. Эта защита корректирует по модулю и фазе токи каждой обмотки в зависимости от векторной группы и мощности трансформатора, а также установленных значений напряжения и тока. Затем защита пофазно сравнивает откорректированные токи.



В соответствии с условиями измерения токов, представленными на схеме, и с учетом установленного монтажа значения дифференциального тока (Id) и тормозного тока (It) каждой фазы вычисляются по значениям откорректированных токов (I_{rec}) и (I'_{rec}).

- Дифференциальный ток: $I_{dx} = |\vec{I}'_{xm} + \vec{I}_{xm}|$ где x = 1, 2 или 3.
- Тормозной ток: $I_{tx} = \max(|\vec{I}'_{xm}|, |\vec{I}_{xm}|)$ где x = 1, 2 или 3

Защита срабатывает, если дифференциальный ток хотя бы одной фазы превышает уставку срабатывания, определяемую:

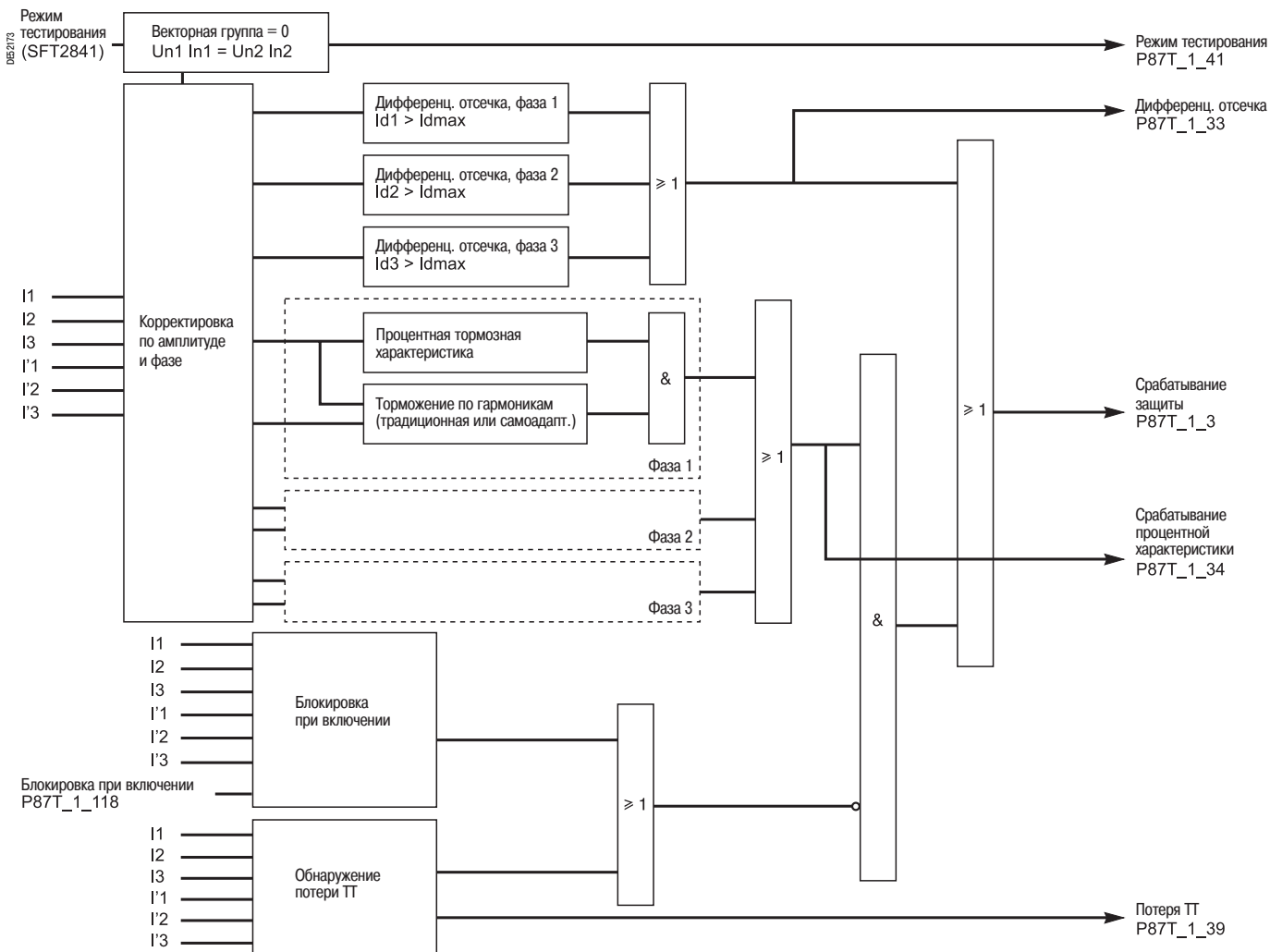
- дифференциальной отсечкой без торможения;
- тормозной характеристикой;
- минимальным током срабатывания дифференциальной защиты.

Устойчивость работы защиты обеспечивается следующими элементами торможения:

- самоадаптирующееся или традиционное торможение по гармоникам;
- блокировка при включении трансформатора;
- блокировка при потере трансформатора тока.

Максимальная уставка отключения не ограничивается.

Алгоритм работы защиты



Определения

Термины «обмотка 1» и «обмотка 2» используются следующим образом:

- обмотка 1: соответствует цепи, к которой подключены источники токов I1, I2, I3 и производится измерение напряжения V1, V2, V3 или U21, U32;
- обмотка 2: соответствует цепи, к которой подключены источники токов I'1, I'2, I'3.

Электрические величины трансформатора выставляются в окне «Специальные характеристики» программного обеспечения SFT 2841:

- напряжение обмотки 1: Un1;
- напряжение обмотки 2: Un2;
- векторная группа;
- номинальная мощность трансформатора S.

Для простоты ввода уставок в данном окне приводятся следующие данные:

- значение номинального тока трансформатора для обмоток 1 и 2: In1, In2;
- значение базового тока Ib обмотки 1, параметрируемое в окне «Датчики ТТ/ТН»;
- значение базового тока I'b обмотки 2, вычисляемое с помощью коэффициента трансформации.

Корректировка

Принцип

Прямое сравнение значений токов в обмотках 1 и 2 невозможно по причине наличия коэффициента трансформации и сдвига фаз, которые вводятся силовым трансформатором.

Serap не использует корректирующий ТТ. В Serap используются данные о номинальной мощности и напряжении обмоток для вычисления коэффициента трансформации и, таким образом, для корректировки токов по модулю. Векторная группа используется для корректировки токов по фазе.

Корректировка обмотки 1

Корректировка обмотки 1 всегда одна и та же независимо от векторной группы трансформатора. Она заключается в исключении составляющей нулевой последовательности токов, чтобы сделать защиту нечувствительной к внешним замыканиям на землю.

$$\vec{I}_{1m} = \frac{\vec{I}_1}{In1} - \frac{\vec{I}'_1 + \vec{I}'_2 + \vec{I}'_3}{3In1}$$

$$\vec{I}_{2m} = \frac{\vec{I}_2}{In1} - \frac{\vec{I}'_1 + \vec{I}'_2 + \vec{I}'_3}{3In1}$$

$$\vec{I}_{3m} = \frac{\vec{I}_3}{In1} - \frac{\vec{I}'_1 + \vec{I}'_2 + \vec{I}'_3}{3In1}$$

Корректировка обмотки 2 и векторная группа

Корректировка обмотки 2 – это корректировка по модулю и фазе с учетом векторной группы трансформатора.

В соответствии со стандартом МЭК 60076-1 векторная группа дана для трансформатора, подключенного к источнику питания с чередованием вращения фаз 123. Serap использует это значение векторной группы независимо от направления вращения фаз в сети: 123 или 132. Таким образом, нет необходимости дополнять эту группу вектором 12 для сети с вращением фаз типа 132. После правильного подключения датчиков тока Serap производит измерение сдвига фаз между токами обмотки 1 и обмотки 2, после деления на 30°, получают векторную группу.

На следующей странице представлена таблица векторных диаграмм и формул корректировки в зависимости от векторной группы трансформатора для сетей с направлением вращения фаз типа 123.

Вычисление откорректированных токов обмотки 2

Векторная группа	Обмотка 1	Обмотка 2	Корректировка	Векторная группа	Обмотка 1	Обмотка 2	Корректировка
0			$\vec{I}'_{1m} = \frac{\vec{I}'_1}{In2} - \frac{\vec{I}'_1 + \vec{I}'_2 + \vec{I}'_3}{3In2}$ $\vec{I}'_{2m} = \frac{\vec{I}'_2}{In2} - \frac{\vec{I}'_1 + \vec{I}'_2 + \vec{I}'_3}{3In2}$ $\vec{I}'_{3m} = \frac{\vec{I}'_3}{In2} - \frac{\vec{I}'_1 + \vec{I}'_2 + \vec{I}'_3}{3In2}$	6			$\vec{I}'_{1m} = -\frac{\vec{I}'_1}{In2} + \frac{\vec{I}'_1 + \vec{I}'_2 + \vec{I}'_3}{3In2}$ $\vec{I}'_{2m} = -\frac{\vec{I}'_2}{In2} + \frac{\vec{I}'_1 + \vec{I}'_2 + \vec{I}'_3}{3In2}$ $\vec{I}'_{3m} = -\frac{\vec{I}'_3}{In2} + \frac{\vec{I}'_1 + \vec{I}'_2 + \vec{I}'_3}{3In2}$
1			$\vec{I}'_{1m} = \frac{\vec{I}'_1 - \vec{I}'_2}{\sqrt{3} In2}$ $\vec{I}'_{2m} = \frac{\vec{I}'_2 - \vec{I}'_3}{\sqrt{3} In2}$ $\vec{I}'_{3m} = \frac{\vec{I}'_3 - \vec{I}'_1}{\sqrt{3} In2}$	7			$\vec{I}'_{1m} = \frac{\vec{I}'_2 - \vec{I}'_1}{\sqrt{3} In2}$ $\vec{I}'_{2m} = \frac{\vec{I}'_3 - \vec{I}'_2}{\sqrt{3} In2}$ $\vec{I}'_{3m} = \frac{\vec{I}'_1 - \vec{I}'_3}{\sqrt{3} In2}$
2			$\vec{I}'_{1m} = -\frac{\vec{I}'_2}{In2} + \frac{\vec{I}'_1 + \vec{I}'_2 + \vec{I}'_3}{3In2}$ $\vec{I}'_{2m} = -\frac{\vec{I}'_3}{In2} + \frac{\vec{I}'_1 + \vec{I}'_2 + \vec{I}'_3}{3In2}$ $\vec{I}'_{3m} = -\frac{\vec{I}'_1}{In2} + \frac{\vec{I}'_1 + \vec{I}'_2 + \vec{I}'_3}{3In2}$	8			$\vec{I}'_{1m} = \frac{\vec{I}'_2}{In2} - \frac{\vec{I}'_1 + \vec{I}'_2 + \vec{I}'_3}{3In2}$ $\vec{I}'_{2m} = \frac{\vec{I}'_3}{In2} - \frac{\vec{I}'_1 + \vec{I}'_2 + \vec{I}'_3}{3In2}$ $\vec{I}'_{3m} = \frac{\vec{I}'_1}{In2} - \frac{\vec{I}'_1 + \vec{I}'_2 + \vec{I}'_3}{3In2}$
3			$\vec{I}'_{1m} = \frac{\vec{I}'_3 - \vec{I}'_2}{\sqrt{3} In2}$ $\vec{I}'_{2m} = \frac{\vec{I}'_1 - \vec{I}'_3}{\sqrt{3} In2}$ $\vec{I}'_{3m} = \frac{\vec{I}'_2 - \vec{I}'_1}{\sqrt{3} In2}$	9			$\vec{I}'_{1m} = \frac{\vec{I}'_2 - \vec{I}'_3}{\sqrt{3} In2}$ $\vec{I}'_{2m} = \frac{\vec{I}'_3 - \vec{I}'_1}{\sqrt{3} In2}$ $\vec{I}'_{3m} = \frac{\vec{I}'_1 - \vec{I}'_2}{\sqrt{3} In2}$
4			$\vec{I}'_{1m} = \frac{\vec{I}'_3}{In2} - \frac{\vec{I}'_1 + \vec{I}'_2 + \vec{I}'_3}{3In2}$ $\vec{I}'_{2m} = \frac{\vec{I}'_1}{In2} - \frac{\vec{I}'_1 + \vec{I}'_2 + \vec{I}'_3}{3In2}$ $\vec{I}'_{3m} = \frac{\vec{I}'_2}{In2} - \frac{\vec{I}'_1 + \vec{I}'_2 + \vec{I}'_3}{3In2}$	10			$\vec{I}'_{1m} = -\frac{\vec{I}'_3}{In2} + \frac{\vec{I}'_1 + \vec{I}'_2 + \vec{I}'_3}{3In2}$ $\vec{I}'_{2m} = -\frac{\vec{I}'_1}{In2} + \frac{\vec{I}'_1 + \vec{I}'_2 + \vec{I}'_3}{3In2}$ $\vec{I}'_{3m} = -\frac{\vec{I}'_2}{In2} + \frac{\vec{I}'_1 + \vec{I}'_2 + \vec{I}'_3}{3In2}$
5			$\vec{I}'_{1m} = \frac{\vec{I}'_3 - \vec{I}'_1}{\sqrt{3} In2}$ $\vec{I}'_{2m} = \frac{\vec{I}'_1 - \vec{I}'_2}{\sqrt{3} In2}$ $\vec{I}'_{3m} = \frac{\vec{I}'_2 - \vec{I}'_3}{\sqrt{3} In2}$	11			$\vec{I}'_{1m} = \frac{\vec{I}'_1 - \vec{I}'_3}{\sqrt{3} In2}$ $\vec{I}'_{2m} = \frac{\vec{I}'_2 - \vec{I}'_1}{\sqrt{3} In2}$ $\vec{I}'_{3m} = \frac{\vec{I}'_3 - \vec{I}'_2}{\sqrt{3} In2}$

Режим тестирования

Для облегчения обслуживания и настройки существуют два режима:

- Функции защиты управляют, в соответствии с параметрированием, выходами отключения и сигнализации. Это обычный режим работы.
 - Функции защиты управляют выходами отключения и сигнализации с помощью регулировок режима тестирования.
- Этот режим доступен только с помощью программного обеспечения SFT 2841, при подключенной программе и после ввода пароля. При отключении программного обеспечения оборудование переходит в нормальный режим работы.

Переход из нормального режима в режим тестирования может вызвать ложное срабатывание защиты, если защищаемый трансформатор включен в сеть.

Регулировки в режиме тестирования:

- $Un1 = \frac{S}{In \times \sqrt{3}}$
- $Un2 = \frac{S}{I'n \times \sqrt{3}}$
- векторная группа = 0.

Дифференциальная отсечка

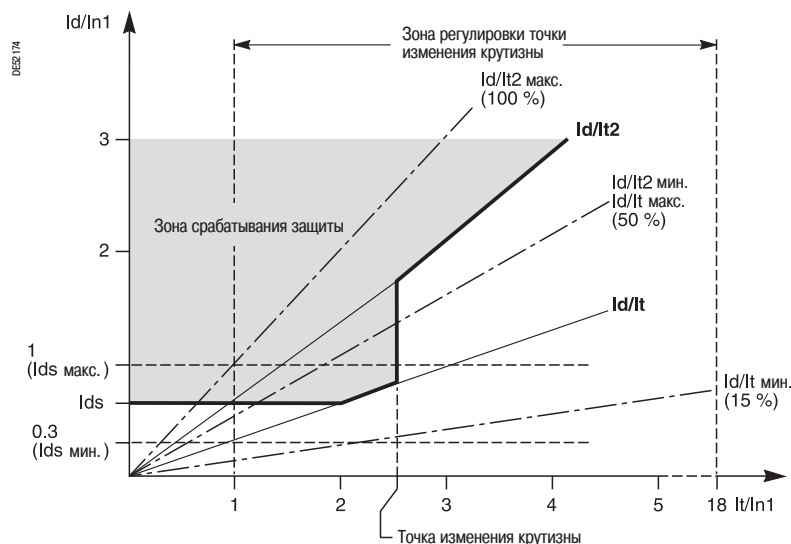
Уставка дифференциальной отсечки, без торможения, гарантирует быстрое отключение защитой при больших токах повреждения. Данная уставка выставляется выше значения тока включения.

Процентная тормозная характеристика

Процентная тормозная характеристика состоит из нескольких участков, определяемых:

- минимальной уставкой (I_{ds});
- двумя прямыми, проходящими через начало координат с регулируемыми углами наклона (крутизной) (I_d/I_t и I_d/I_{t2});
- точкой изменения крутизны.

Тормозная характеристика служит отстройкой от токов не баланса, вызванных погрешностями в измерении трансформаторов тока, изменением коэффициента, связанного с работой РПН, и для того, чтобы сделать защиту нечувствительной к отводу мощности со вторичной обмотки.



Самоадаптирующееся торможение

Самоадаптирующееся торможение используется, в частности, в трансформаторах, для которых:

$$\hat{i}_{inr} < \frac{8}{\sqrt{2}} \hat{i}_n = 8I_n$$

- где:
- \hat{i}_{inr} – пиковый пусковой ток;
 - \hat{i}_n – пиковый номинальный ток;
 - I_n – номинальный ток трансформатора.

Это торможение выполненное на основе принципа нейронной сети, обеспечивает устойчивую работу защиты при внешнем к.з. путем анализа коэффициентов 2-й и 5-й гармоник, значений дифференциального и тормозного тока.

Такое торможение обеспечивает устойчивость работы защиты:

- при включении трансформатора;
- при несимметричном коротком замыкании вне защищаемой зоны и приводящем к насыщению датчиков тока;
- при эксплуатации трансформатора, работающего на повышенном напряжении (сверхтоке).

При наличии гармоник и в зависимости от значений тормозного и дифференциального токов это торможение автоматически увеличивает минимальную уставку и крутизну процентной характеристики.

Данный элемент торможения также является более чувствительным, чем дифференциальная отсечка. Таким образом, нет необходимости использовать дифференциальную отсечку, когда используется данное торможение. Более того, это торможение включает в себя тормозную характеристику для отстройки защиты при большом сквозном токе, который может привести к насыщению датчиков тока. Следовательно, нет необходимости включать участок крутизны I_d/I_{t2} .

Традиционное торможение

Традиционное торможение включает уставки по 2-й и 5-й гармоникам для каждой фазы.

Уставка по 2-й гармонике обеспечивает устойчивую работу защиты при включении трансформатора, а также при насыщении датчиков тока. Торможение может быть общим, то есть когда значение 2-й гармоники в одной фазе превышает уставку, производится торможение трех фаз, либо тормозится только "своя" фаза.

При использовании трансформатора в трехфазной сети рекомендуется применять общее торможение.

Уставка по 5-й гармонике обеспечивает устойчивую работу защиты, когда трансформатор работает на повышенном напряжении. Торможение может быть общим по трем фазам или действовать только на "свою" фазу. Обычно рекомендуется применять пофазное торможение.

Дифференциальная защита трансформатора

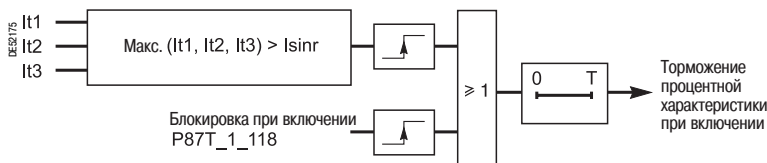
Код ANSI 87T

Блокировка при включении

В некоторых случаях содержание гармоник в токе включения трансформатора не являются достаточными для запуска торможения. В этом случае активизируется дополнительное торможение:

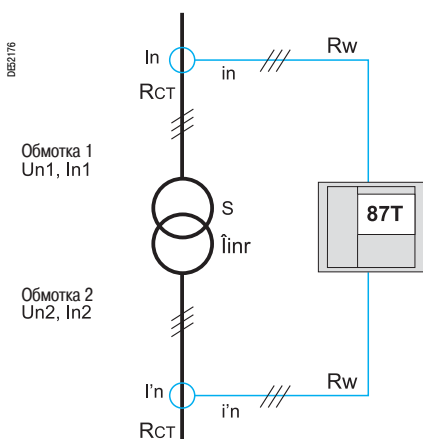
- если тормозной ток больше уставки I_{sinr} ;
- с помощью логической переменной P87T_1_118, которая управляется логическими уравнениями или программой Logipram.

Данное торможение действует на тормозные характеристики каждой фазы в течение регулируемой выдержки времени T. Торможение не применяется для дифференциальной отсечки.



Блокировка при потере трансформатора тока (ТТ)

Потеря трансформатора тока (ТТ) может быть причиной возникновения «ложного» дифференциального тока, вызывающего ложное срабатывание защиты. Такое торможение позволяет - путем анализа дискретных значений дифференциального и тормозного тока - выявить измерение, неправильно показывающее нуль.



Установка параметров и характеристик датчиков фазного тока

Номинальный первичный ток трансформаторов тока устанавливается по следующей формуле:

- для обмотки 1: $0.1 \times \frac{S}{Un1 \times \sqrt{3}} \leq In \leq 2.5 \times \frac{S}{Un1 \times \sqrt{3}}$
- для обмотки 2: $0.1 \times \frac{S}{Un2 \times \sqrt{3}} \leq I'n \leq 2.5 \times \frac{S}{Un2 \times \sqrt{3}}$

Параметры и характеристики датчиков тока для обмоток 1 и 2 устанавливаются в соответствии со значением пикового пускового тока трансформатора (\hat{i}_{inr}).

Нижеуказанные формулы применяются для трансформаторов тока (ТТ) с обмотками 1 и 2.

In – номинальный первичный ток ТТ.

i_n – номинальный вторичный ток ТТ.

R_{ct} – внутреннее сопротивление ТТ.

R_w – сопротивление цепей и нагрузки ТТ.

Вариант 1: $\hat{i}_{inr} < 6.7\sqrt{2} In$

Используются трансформаторы тока:

- типа 5P20 номинальной мощностью $V_{Act} \geq R_w \cdot i_n^2$
- или выбираются в зависимости от напряжения точки перегиба по формуле $V_k \geq (R_{ct} + R_w) \cdot 20 \cdot i_n$

Вариант 2: $\hat{i}_{inr} > 6.7\sqrt{2} In$

Используются трансформаторы тока:

- типа 5P20, имеющие:
- предельный коэффициент точности $FLP \geq 3 \cdot \frac{\hat{i}_{inr}}{\sqrt{2} \cdot i_n}$
- номинальную мощность $V_{Act} \geq R_w \cdot i_n^2$
- или выбираются в зависимости от напряжения точки перегиба по формуле $V_k \geq (R_{ct} + R_w) \cdot 3 \cdot \frac{\hat{i}_{inr}}{\sqrt{2} \cdot i_n} \cdot i_n$

Дифференциальная защита трансформатора

Код ANSI 87T

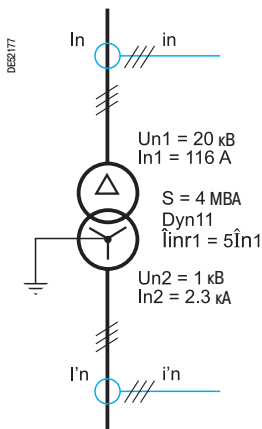
Характеристики

Регулировки				
Мин. уставка Ids				
регулировка				30 % - 100 % In1
точность (1)				±2 %
разрешение				1 %
коэффициент возврата				93,5 % ±5 %
Процентная характеристика Id/It				
регулировка				15 - 50 %
точность (1)				±2 %
разрешение				1 %
коэффициент возврата				93,5 % ±5 %
Процентная характеристика Id/It2				
регулировка				нет, 50 % - 100 %
точность (1)				±2 %
разрешение				1 %
коэффициент возврата				93,5 % ±5 %
Точка изменения крутизны				
регулировка				нет, In1 - 18 In1
точность (1)				±5 %
разрешение				0.1 In1
коэффициент возврата				93,5 % ±5 %
Режим тестирования				
регулировка				активн. / неактивн.
Предварительные регулировки				
выбор вида торможения				традиционное / самоадаптирующееся
Блокировка при потере ТТ				
регулировка				активн. / неактивн.
Блокировка при включении				
регулировка				активн. / неактивн.
Magnetization	регулировка			1 % - 10 %
current set point	точность (1)			±5 %
lsinr	разрешение			1 %
	коэффициент возврата			90 % ±5 % или 0,5 % In1
Выдержка времени	регулировка			0 to 300 s
	точность (1)			±2 % или -10 мс - +25 мс
	разрешение			10 мс
Макс. уставка Idmax.				
регулировка	традиционное торможение			3 - 18 In1
	самоадаптирующееся торможение			нет, 3 - 18 In1
точность (1)				±2 %
разрешение				1 %
коэффициент возврата				93,5 % ±5 %
Уставка по 2-й гармонике для традиционного торможения				
регулировка				нет, 5 - 40 %
точность (1)				±5 %
разрешение				1 %
коэффициент возврата				90 % ±5 %
Действие уставки по 2-й гармонике при традиционном торможении				
регулировка				пофазно / общее
Уставка по 5-й гармонике для традиционного торможения				
регулировка				нет, 5 - 40 %
точность (1)				±5 %
разрешение				1 %
коэффициент возврата				90 % ±5 %
Действие уставки по 5-й гармонике при традиционном торможении				
регулировка				пофазно / общее
Временные характеристики				
время срабатывания по дифференциальной отсечки				< 45 мс при 2 Id
время срабатывания по процентной характеристике				< 45 мс при 2 Id
время возврата				< 45 мс при 2 Id
Входы				
Назначение	Код в редакторе уравнений	Логические уравнения	Logipat	
возврат функции защиты	R87T_1_101	■	■	
блокировка функции защиты	R87T_1_113	■	■	
блокировка при включении	R87T_1_118	■	■	
Выходы				
Назначение	Код в редакторе уравнений	Логические уравнения	Logipat	Матрица управления
выход функции защиты	R87T_1_3	■	■	■
блокировка функции защиты	R87T_1_16	■	■	-
дифференциальная отсечка	R87T_1_33	■	■	-
сраб. по процентной характеристике	R87T_1_34	■	■	-
потеря ТТ	R87T_1_39	■	■	-
режим тестирования	R87T_1_41	■	■	-

(1) В стандартных условиях (МЭК 60255-6).

Дифференциальная защита трансформатора

Код ANSI 87T



Пример 1

Трансформатор 4 МВА, Dyn11, 20 кВ/1 кВ, пиковый пусковой ток составляет: $\hat{I}_{nr} = 5\hat{I}_n$

Трансформатор обычно работает при своей номинальной нагрузке, но в исключительных случаях выдерживает нагрузку в 120% от своей номинальной мощности.

Выбор датчиков

Номинальный ток обмоток составляет:

$$I_{n1} = \frac{S}{\sqrt{3} U_{n1}} = \frac{4 \text{ МВА}}{\sqrt{3} \cdot 20 \text{ кВ}} = 116 \text{ А} \quad \text{и} \quad I_{n2} = \frac{S}{\sqrt{3} U_{n2}} = \frac{4 \text{ МВА}}{\sqrt{3} \cdot 1 \text{ кВ}} = 2.3 \text{ кА}$$

Датчики тока допускают перегрузку в 120%:

$$I_n > 116 \text{ А} \times 1.2 = 139.2 \text{ А} \quad \text{и} \quad I'_n > 2.3 \text{ кА} \times 1.2 = 2.76 \text{ кА}$$

Кроме того, значения первичных токов датчиков тока должны соответствовать следующим условиям:

$$0.1 \frac{S}{\sqrt{3} U_{n1}} \leq I_n \leq 2.5 \frac{S}{\sqrt{3} U_{n1}} \quad \text{и} \quad 0.1 \frac{S}{\sqrt{3} U_{n2}} \leq I'_n \leq 2.5 \frac{S}{\sqrt{3} U_{n2}}$$

Допустим, что для данного трансформатора дано:

$$11.6 \text{ А} \leq I_n \leq 290 \text{ А} \quad \text{и} \quad 230 \text{ А} \leq I'_n \leq 5.75 \text{ кА}$$

В соответствии с этими двумя ограничениями выбранные значения являются величинами, определенными МЭК:

$$I_n = 150 \text{ А} \quad \text{и} \quad I'_n = 3 \text{ кА}$$

Пусковой ток: $\hat{I}_{nr} = 5\hat{I}_n$, либо для обмотки 1, либо для обмотки 2:

$$\hat{I}_{nr1} = 5 \times \sqrt{2} \times 116 \text{ А} = 820 \text{ А}$$

$$\hat{I}_{nr2} = 5 \times \sqrt{2} \times 2.3 \text{ кА} = 16.3 \text{ кА}$$

Эти значения пусковых токов сравниваются с номинальным током датчиков тока, чтобы выбрать предельный коэффициент точности:

$$\frac{\hat{I}_{nr1}}{\sqrt{2} I_n} = \frac{820 \text{ А}}{\sqrt{2} \times 150 \text{ А}} = 3.9 < 6.7 \quad \text{и} \quad \frac{\hat{I}_{nr2}}{\sqrt{2} I'_n} = \frac{16.3 \text{ кА}}{\sqrt{2} \times 3 \text{ кА}} = 3.8 < 6.7$$

Таким образом, предельный коэффициент точности составляет 20 при номинальной мощности: $V_{Act} \geq R_w \cdot I_n^2$.

Выбранные датчики следующие:

- для обмотки 1: 150 А/1 А, 5P20 при V_{Act1} ;
- для обмотки 2: 3 кА/1 А, 5P20 при V_{Act2} .

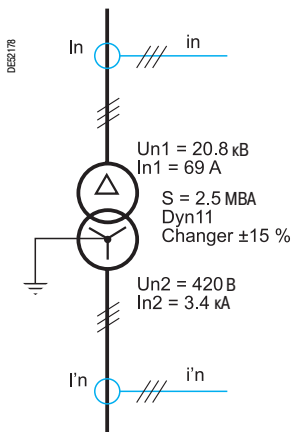
Настройка кривой процентной характеристики и уставки дифференциальной отсечки

Данный трансформатор не имеет ни РПН ни вспомогательной обмотки, поэтому уставка отключения защитой настраивается на минимум ($I_{ds} = 30\%$), и крутизна кривой процентной характеристики составляет $I_d/I_t = 15\%$.

Если отношение между пусковым и номинальным током меньше 8/42, выбирается вариант самоадаптирующегося ограничения гармоник. Второй участок крутизны процентной кривой и дифференциальная отсечка не требуются и, следовательно, не используются.

Дифференциальная защита трансформатора

Код ANSI 87T



Пример 2

Трансформатор 2,5 МВА, Дун 11, 20,8 кВ/420 В, пиковый пусковой ток составляет: $\hat{I}_{inr} = 9.6 \hat{I}_n$

Трансформатор имеет РПН с диапазоном регулировки $\pm 15\%$ от номинального напряжения обмотки 2.

Выбор датчиков

Номинальный ток обмоток составляет:

$$I_{n1} = \frac{S}{\sqrt{3} U_{n1}} = \frac{2.5 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 20.8 \text{ kV}} = 69 \text{ A} \quad \text{и} \quad I_{n2} = \frac{S}{\sqrt{3} U_{n2}} = \frac{2.5 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 420 \text{ V}} = 3.4 \text{ kA}$$

Датчики тока допускают перегрузку в 115%, связанную с работой РПН:

$$I_n > 69 \text{ A} \times 1.15 = 79.4 \text{ A} \quad \text{и} \quad I'n > 3.4 \text{ kA} \times 1.15 = 3.91 \text{ kA}$$

Кроме того, значения первичных токов датчиков тока должны соответствовать следующим условиям:

$$0.1 \frac{S}{\sqrt{3} U_{n1}} \leq I_n \leq 2.5 \frac{S}{\sqrt{3} U_{n1}} \quad \text{и} \quad 0.1 \frac{S}{\sqrt{3} U_{n2}} \leq I'n \leq 2.5 \frac{S}{\sqrt{3} U_{n2}}$$

Допустим, что для данного трансформатора дано:

$$6.9 \text{ A} \leq I_n \leq 173 \text{ A} \quad \text{и} \quad 340 \text{ A} \leq I'n \leq 8.5 \text{ kA}$$

В соответствии с этими двумя ограничениями выбранные значения являются величинами, определенными МЭК:

$$I_n = 100 \text{ A} \quad \text{и} \quad I'n = 4 \text{ kA}$$

Пусковой ток: $\hat{I}_{inr} = 9.6 \hat{I}_n$, либо для обмотки 1, либо для обмотки 2:

$$\hat{I}_{inr1} = 9.6 \times \sqrt{2} \times 69 \text{ A} = 937 \text{ A}$$

$$\hat{I}_{inr2} = 9.6 \times \sqrt{2} \times 3.4 \text{ kA} = 46.2 \text{ kA}$$

Эти значения пусковых токов сравниваются с номинальным током датчиков тока, для того чтобы выбрать предельный коэффициент кратности:

$$\frac{\hat{I}_{inr1}}{\sqrt{2} I_n} = \frac{937 \text{ A}}{\sqrt{2} \times 100 \text{ A}} = 6.6 < 6.7 \quad \text{и} \quad \frac{\hat{I}_{inr2}}{\sqrt{2} I'n} = \frac{46.2 \text{ kA}}{\sqrt{2} \times 4 \text{ kA}} = 8.2 > 6.7$$

Таким образом, предельный коэффициент кратности составляет 20 для датчиков обмотки 1

$$\text{и равен} \quad 3 \frac{\hat{I}_{inr2}}{\sqrt{2} I'n} = 3 \frac{46.2 \text{ kA}}{\sqrt{2} \times 4 \text{ kA}} = 24.5 \quad \text{для обмотки 2.}$$

Выбирается наиболее близкое нормальное значение, то есть 20.

Выбранные датчики следующие:

- для обмотки 1: 100 А/1 А, 5Р20;
- для обмотки 2: 4 кА/1 А, 5Р30.

Настройка кривой процентной характеристики и уставки дифференциальной отсечки

Данный трансформатор имеет РПН. Установившийся дифференциальный ток, возникающий в результате изменения коэффициента трансформации под действием РПН, составляет:

$$I_d \text{ регулятора} = \frac{x}{1-x} \times 100\%$$

где: x – максимальное изменение напряжения регулятором; в данном примере $x = 0,15$.

Дифференциальный ток, возникающий в результате изменения коэффициента трансформации, составляет:

$$I_d \text{ регулятора} = \frac{0.15}{1-0.15} \times 100\% = 17.6\%$$

Используются датчики типа 5Р, они имеют максимальную погрешность измерения 10%.

Реле имеет точность измерения $\pm 1\%$ при I_{ds} и I_d/I_t .

Таким образом, минимальный ток срабатывания следующий:

$$I_{ds} = I_d \text{ регулятора} + I_d \text{ измерения} + I_d \text{ реле} + \text{допустимый предел.}$$

При допустимом пределе примерно 5% минимальный ток срабатывания:

$$I_{ds} = 17.6 + 10 + 1 + 5 \approx 34\%$$

I_{ds} и крутизна I_d/I_t устанавливаются на 34%.

Отношение между пусковым и номинальным током составляет 9,6.

Если это отношение больше $8/\sqrt{2}$, выбирается вариант традиционного торможения по гармоникам.

Второй участок крутизны процентной кривой активируется и устанавливается на 70%, начиная с 6 I_n 1, чтобы обеспечить надлежащую устойчивость работы защиты при внешнем коротком замыкании.

Уставка дифференциальной отсечки настраивается больше значения пускового тока с допустимым пределом:

$$I_d \text{ макс.} = \sqrt{2} \times \frac{\hat{I}_{inr}}{\hat{I}_n} = \sqrt{2} \times 9.6 I_{n1} = 13.6 I_{n1}$$

Традиционное торможение по гармоникам устанавливается следующим образом:

- уставка по 2-й гармонике равна 20%, при торможении всех 3-х фаз;
- уставка по 5-й гармонике равна 25%, при пофазном торможении.