

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-3-203–224

УДК 621.316.925

Комплексная модель для исследования функционирования цифровой дифференциальной защиты силового трансформатора

Ю. В. Румянцев¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. В статье представлена комплексная модель для исследования цифровой дифференциальной защиты двухобмоточного силового трансформатора. Модель разработана в среде динамического моделирования MatLab-Simulink с использованием пакета расширения SimPowerSystems и включает в себя следующие элементы: источник питания, трехфазный силовой трансформатор, трехфазные группы трансформаторов тока и модель цифровой дифференциальной защиты трансформатора. Каждый элемент модели описан в степени, достаточной для понимания его реализации в среде динамического моделирования. Особое внимание уделено описанию принципов обработки, цифровой фильтрации и способам формирования рабочего и тормозного токов основного элемента комплексной модели – цифровой дифференциальной защиты трансформатора. Методом вычислительного эксперимента с использованием разработанной модели исследовано функционирование цифровой дифференциальной защиты трансформатора при внешних и внутренних (по отношению к защищаемому трансформатору) повреждениях: внутреннее короткое замыкание, внешние короткие замыкания без насыщения и с насыщением трансформаторов тока со стороны низшего напряжения. Для каждого рассмотренного случая приведены осциллограммы рабочего и тормозного токов исследуемой цифровой защиты. Особое внимание уделено анализу функционирования цифровой дифференциальной защиты трансформатора при аномальных режимах работы силового трансформатора: перевозбуждении и возникновении броска тока намагничивания. Приведены осциллограммы протекающих в данных режимах токов и их гармонический состав. Проанализированы причины возникновения данных режимов. Рассмотрены алгоритмы блокирования работы цифровой дифференциальной защиты трансформатора в аномальных режимах, основанные на гармоническом анализе протекающих токов. Показаны недостатки данных алгоритмов и отмечена необходимость их технического совершенствования.

Ключевые слова: моделирование, релейная защита, трансформатор тока, цифровая дифференциальная защита трансформатора, цифровая обработка сигналов, Simulink, MatLab, SimPowerSystems

Для цитирования: Румянцев, Ю. В. Комплексная модель для исследования функционирования цифровой дифференциальной защиты силового трансформатора / Ю. В. Румянцев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 3. С. 203–224

Адрес для переписки

Румянцев Юрий В.
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-52
y.rumiantsev@gmail.com

Address for correspondence

Rumiantsev Yury V.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-52
y.rumiantsev@gmail.com

A Comprehensive Model for the Power Transformer Digital Differential Protection Functioning Research

Yu. V. Rumiantsev¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. This article presents a comprehensive model for the two-winding power transformer digital differential protection functioning research. Considered comprehensive model is developed in MatLab-Simulink dynamic simulation environment with the help of SimPowerSystems component library and includes the following elements: power supply, three-phase power transformer, wye-connected current transformers and two-winding power transformer digital differential protection model. Each element of the presented model is described in the degree sufficient for its implementation in the dynamic simulation environment. Particular attention is paid to the digital signal processing principles and to the ways of differential and restraining currents forming of the considered comprehensive model main element – power transformer digital differential protection. With the help of this model the power transformer digital differential protection functioning was researched during internal and external faults: internal short-circuit, external short-circuit with and without current transformers saturation on the power transformer low-voltage side. Each experiment is illustrated with differential and restraining currents waveforms of the digital differential protection under research. Particular attention was paid to the digital protection functioning analysis during power transformer abnormal modes: overexcitation and inrush current condition. Typical current waveforms during these modes were showed and their harmonic content was investigated. The causes of these modes were analyzed in details. Digital differential protection blocking algorithms based on the harmonic content were considered. Drawbacks of these algorithms were observed and the need of their further technical improvement was marked.

Keywords: simulation, relay protection, current transformer, transformer digital differential protection, digital signal processing, Simulink, MatLab, SimPowerSystems

For citation: Rumiantsev Yu. V. (2016) A Comprehensive Model for the Power Transformer Digital Differential Protection Functioning Research. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (3), 203–224 (in Russian)

Введение

Пакет расширения SimPowerSystems-системы динамического моделирования MatLab-Simulink является распространенным инструментом для моделирования электротехнических устройств. Все модели, входящие в данный пакет, проверены в лабораториях канадского производителя электроэнергетики – компании Hydro-Québec, где подтверждена адекватность их реализации и математического описания [1]. В библиотеке данного пакета присутствует модель трехфазного двухобмоточного трансформатора, которая является важнейшим элементом как для моделирования энергосистемы, так и для проверки методом вычислительного эксперимента работоспособности современных устройств релейной защиты (РЗ), в частности цифровой дифференциальной защиты трансформатора (ДЗТ) с торможением [2]. Правильное функционирование устройств РЗ во время переходных процессов в основном зависит от формы кривой переменного тока, подводимого к устройству защиты энергообъекта. Вследствие насыщения магнитопроводов трансформаторов тока (ТТ) в аварийном режиме форма

вторичного тока может существенно отличаться от формы его первичного тока, что значительно влияет на надежность срабатывания цифровой ДЗТ, так как принцип ее функционирования основан на сравнении токов со всех сторон защищаемого объекта.

Отсутствие в SimPowerSystems стандартных моделей измерительно-го ТТ и цифровых устройств РЗ значительно ограничивает применение данной среды моделирования в исследованиях, связанных с анализом функционирования современных устройств РЗ. Однако данный программный пакет может быть дополнен пользовательскими моделями, созданными с использованием стандартных блоков библиотеки Simulink.

Моделирование трехфазного двухобмоточного силового трансформатора

Стандартная модель трехфазного двухобмоточного трансформатора Three-phase Transformer (Two Windings) из библиотеки SimPowerSystems построена на основе трех однофазных трансформаторов [1].

Выражения [3] для расчета в относительных единицах (о. е.) параметров модели силового трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Δ-11, в которых используются только каталожные данные силового трансформатора: $S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность силового трансформатора (ВА); P_k – мощность потерь короткого замыкания (Вт); U_k – напряжение короткого замыкания (%); P_0 – мощность потерь холостого хода (Вт); I_0 – ток холостого хода (%), приведены в табл. 1. В модели также необходимо задать значения номинальных напряжений обмоток высшего (ВН) и низшего (НН) напряжений силового трансформатора $U_{1\text{ном}}$ и $U_{2\text{ном}}$ (В) соответственно и номинальную частоту $f_{\text{ном}}$ (Гц).

Таблица 1

Упрощенные формулы для расчета параметров модели трансформатора
Simplified formulas for transformer model parameters calculation

| Параметр | Значение, о. е. |
|---|--|
| Активное сопротивление первичной и вторичной обмоток трансформатора | $R_{1(\text{о.е.})} = R_{2(\text{о.е.})} = \frac{1}{2} \frac{P_k}{S_{\text{ном}}}$ |
| Индуктивность первичной и вторичной обмоток трансформатора | $L_{1(\text{о.е.})} = L_{2(\text{о.е.})} = \frac{1}{2} \frac{U_k}{100}$ |
| Активное сопротивление ветви намагничивания | $R_{m(\text{о.е.})} = \frac{S_{\text{ном}}}{P_0}$ |
| Индуктивность ветви намагничивания | $L_{m(\text{о.е.})} \approx \frac{100}{I_0}$ |

Моделирование трехфазной группы ТТ с соединением вторичных обмоток и нагрузок по схеме «звезда с нулевым проводом»

Основной проблемой при моделировании ТТ является отсутствие в общедоступных источниках геометрических параметров его магнитной системы: сечения магнитопровода и средней длины магнитной силовой

линии. Характеристики намагничивания электротехнических сталей, применяемых для производства магнитопроводов различных типов ТТ, в общем случае подобны. Поэтому для создания упрощенной модели ТТ можно принять, что все магнитопроводы ТТ изготовлены из стали одной марки и имеют одинаковую характеристику намагничивания, приведенную в [4]. Математическая модель трехфазной группы ТТ с соединением вторичных обмоток и нагрузок в «звезду с нулевым проводом» содержит уравнения трех однофазных ТТ [5].

После выражения неизвестных геометрических параметров магнитной системы ТТ через его паспортные данные и учитывая принятую характеристику намагничивания, для ТТ со вторичной обмоткой класса точности 10Р и вторичным номинальным током $I_{2ном} = 5$ А система уравнений, описывающая упрощенную модель трехфазной группы ТТ, в общем случае примет следующий вид [6, 7]:

$$\begin{cases} \frac{dB_{mj}}{dt} = \frac{83,34[(0,0004I_{1ном} + R_{нj})i_{2j} + R_0i_0]}{K_{ном}(0,0004I_{1ном} + R_{номj})}, & j = A, B, C; \\ i_{2j} = \frac{5i_{1j}}{I_{1ном}} - 2,25 \cdot 10^{-4} \cdot K_{ном} H_j; \\ B_{mj} = f(H_j); \\ i_0 = i_{2A} + i_{2B} + i_{2C}, \end{cases}$$

где $I_{1ном}$ – номинальный первичный ток ТТ; $K_{ном}$ – номинальная предельная кратность ТТ; $R_{ном}$ – номинальное активное сопротивление нагрузки ТТ; R_n – реальное активное сопротивление нагрузки ТТ; R_0 – активное сопротивление нулевого провода; i_0 – мгновенное значение тока, протекающего в нулевом проводе ТТ; $B_m = f(H)$ – средняя характеристика намагничивания электротехнической стали; i_1, i_2 – мгновенные значения первичного и вторичного токов ТТ соответственно.

Моделирование цифровой дифференциальной защиты трансформатора

Дифференциальная защита является защитой с абсолютной селективностью, действующей без выдержки времени и реагирующей только на повреждение в защищаемой зоне [8]. Принцип действия дифференциальной защиты основан на сравнении токов со всех сторон защищаемого объекта. Цифровая ДЗТ обладает рядом преимуществ по сравнению с выполнением ее на электромеханической элементной базе: программное выравнивание вторичных токов и компенсация фазового сдвига между токами высшей и низшей сторонами трансформатора, правильная работа при определенной степени насыщения измерительных ТТ и т. д. В эпоху электромеханических реле данные процедуры выполнялись при помощи специальных промежуточных ТТ. В цифровых устройствах РЗ такие операции осуществляются программно на основании заданной пользователем информации.

Блок-схема цифровой обработки и фильтрации входных сигналов тока со стороны ВН (HV) и НН (LV) защищаемого силового трехфазного трансформатора приведена на рис. 1. Входные токи i_{a_HV} , i_{b_HV} , i_{c_HV} – вторичные токи трехфазной группы ТТ, расположенной с высшей стороны силового трансформатора; входные токи i_{a_LV} , i_{b_LV} , i_{c_LV} – вторичные токи трехфазной группы ТТ, расположенной с низшей стороны силового трансформатора.

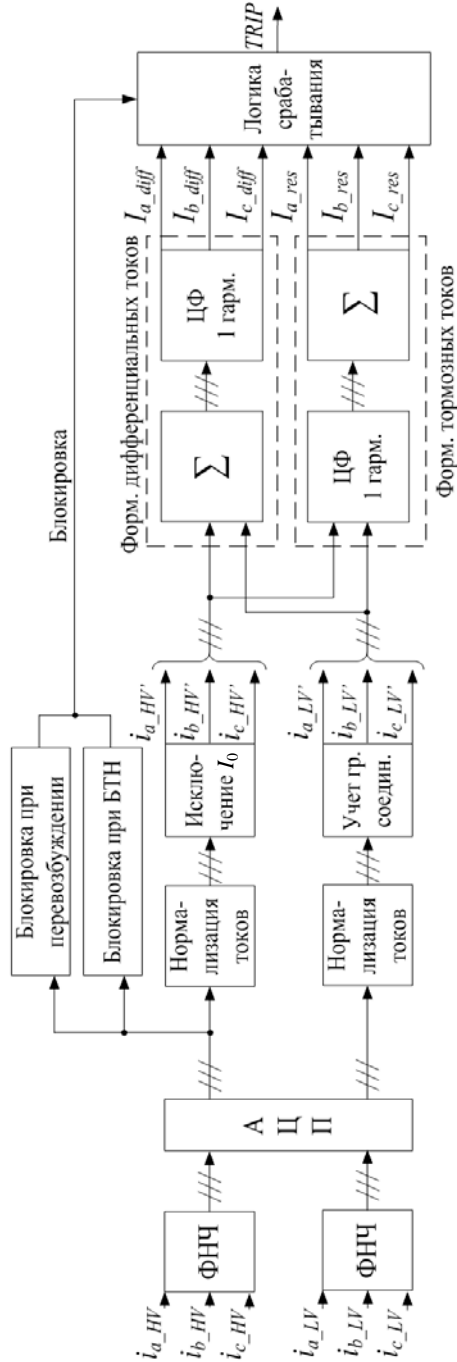


Рис. 1. Блок-схема цифровой обработки и фильтрации входных сигналов

Fig. 1. Digital signal processing and filtering flow chart

Блок «Фильтр нижних частот» (ФНЧ) содержит активный фильтр нижних частот 2-го порядка. Назначение данного аналогового фильтра заключается в подавлении спектральных компонентов, частота которых превышает половину частоты дискретизации. Блок «Аналого-цифровой преобразователь» (АЦП) осуществляет преобразование выборок отсчетов выходного сигнала блока ФНЧ в цифровой код. Число выборок из аналогового непрерывного входного сигнала на период промышленной частоты (50 Гц) в данной статье принято равным 24, т. е. частота дискретизации сигнала составляет 1200 Гц.

В блоках «Блокировка при броске тока намагничивания» (Блокировка при БТН) и «Блокировка при перевозбуждении» формируется сигнал блокировки срабатывания цифровой ДЗТ при аномальных режимах работы защищаемого силового трансформатора.

Блок «Нормализация токов» осуществляет приведение вторичных токов, поступающих с выхода блока АЦП, к одному базису, т. е. перевод данных значений в о. е. Для этого токи с каждой стороны умножаются на нормирующие коэффициенты, которые для каждой из обмоток силового трансформатора рассчитываются следующим образом:

$$K_{HV} = \frac{\sqrt{3}U_{1\text{ном}}I_{1\text{ном}}}{S_{\text{ном}}I_{2\text{ном}}};$$

$$K_{LV} = \frac{\sqrt{3}U_{2\text{ном}}I_{1\text{ном}}}{S_{\text{ном}}I_{2\text{ном}}},$$

где $I_{1\text{ном}}$, $I_{2\text{ном}}$ – номинальный первичный и вторичный токи ТТ с соответствующей стороны силового трансформатора.

Блок «Исключение I_0 » реализует исключение тока нулевой последовательности из токов высшей стороны силового трансформатора (данная операция применяется только в случае заземления нейтрали силового трансформатора), для чего токи стороны ВН силового трансформатора должны быть умножены на матрицу коэффициентов M_1 [9]

$$M_1 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}.$$

Блок «Учет группы соединений» (Учет гр. соедин.) осуществляет компенсацию фазового сдвига между токами низшей стороны силового трансформатора и токами стороны высшего напряжения. Например, для моделируемого силового трансформатора со схемой соединения Y/Δ-11 токи со стороны обмотки Δ опережают токи стороны обмотки Y на 30°. Для ком-

пенсации указанного фазового сдвига токи со стороны обмотки, соединенной в Δ , необходимо умножить на матрицу M_2 [9]

$$M_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Блок «Формирователь дифференциальных токов» (Форм. дифференциальных токов) осуществляет формирование дифференциальных (рабочих) токов для каждой фазы в соответствии с выражением $I_{diff} = |i_{HV} + \nabla i_L|$ [9], при этом за положительное направление тока принято направление «к защищаемому объекту». В блоке «Формирователь тормозных токов» (Форм. тормозных токов) выполняется формирование тормозных токов для каждой фазы одним из следующих способов [9]: $I_{res} = \frac{1}{2}(|i_{HV}| + |i_{LV}|)$, $I_{res} = |i_{HV} - i_{LV}|$, $I_{res} = \frac{1}{2}|i_{HV} - i_{LV}|$, $I_{res} = \max(|i_{HV}|, |i_{LV}|)$, причем наиболее традиционным является принятый в данной статье способ $I_{res} = |i_{HV}| + |i_{LV}|$.

Во всех вышеприведенных формулах оператор « $|$ » соответствует операции вычисления действующего значения. Данная операция выполняется в блоке «Цифровой фильтр 1-й гармоники» (ЦФ 1 гарм.), который содержит цифровой фильтр, предназначенный для определения действующего значения основной гармоники сигнала, содержащего высшие гармоники и апериодическую составляющую. В качестве такого фильтра в данной работе применен цифровой фильтр, реализующий однопериодное дискретное преобразование Фурье, в котором по отсчетам косинусной $I^C(n)$ и синусной $I^S(n)$ ортогональных составляющих входного сигнала определяется действующее значение основной гармоники сигнала $I(n)$ [10, 11]:

$$I^C(n) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(n) \cos(2\pi n / N);$$

$$I^S(n) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(n) \sin(2\pi n / N);$$

$$|I(n)| = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(I^C(n))^2 + (I^S(n))^2},$$

где $n = 0 \dots N - 1$ – номер отсчета контролируемого сигнала в окне наблюдения; $i(n)$ – отсчеты входного сигнала; N – число отсчетов на период промышленной частоты.

На выходе блоков для каждой фазы формируются соответственно дифференциальные и тормозные токи I_{a_diff} , I_{b_diff} , I_{c_diff} и I_{a_res} , I_{b_res} , I_{c_res} . Данные токи поступают в блок «Логика срабатывания», где формируется команда на срабатывание или несрабатывание защиты исходя из заданной характеристики цифровой ДЗТ (рис. 2) с учетом наличия или отсутствия сигнала блокировки.

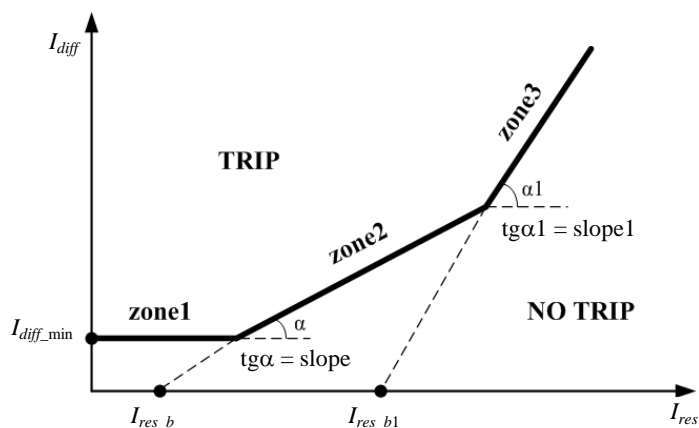


Рис. 2. Характеристика цифровой ДЗТ

Fig. 2. Transformer digital differential protection characteristic

Отличие модели цифровой дифференциальной защиты трансформатора от реального устройства

Цифровая обработка и фильтрация входных сигналов в реальных цифровых устройствах РЗ трансформаторов различных производителей в целом соответствуют блок-схеме на рис. 1. Отличие может заключаться в способе формирования тормозного тока и типах используемых цифровых фильтров [10, 11]. Кроме того, в некоторых цифровых устройствах ДЗТ блокировка срабатывания при аномальных режимах работы защищаемого трансформатора осуществляется на основе анализа дифференциальных токов, а не токов, протекающих со стороны ВН (сторона подачи напряжения), как это принято в данной статье. В представленной модели также не рассматривается функционирование дифференциальной токовой отсечки.

В отличие от реальных устройств цифровой защиты их модели не накладывают никаких физических ограничений, связанных с техническими параметрами используемой аппаратной части. Поэтому реализованная в среде динамического моделирования модель цифровой ДЗТ отличается от реального устройства защиты отсутствием нижеперечисленных аппаратных средств.

В реальных устройствах ДЗТ происходит преобразование входного вторичного тока ТТ в пропорциональное напряжение заданного уровня [11]. Данные входные преобразователи, представляющие собой малога-

баритные промежуточные ТТ, располагаются до блока ФНЧ и обеспечивают гальваническую развязку между внешними и внутренними цепями цифровой защиты. В реальных устройствах ДЗТ также применяется ограничитель входного сигнала АЦП, основное назначение которого заключается в ограничении уровня входного сигнала до значений, соответствующих техническим характеристикам используемого АЦП [11]. Этот ограничитель располагается после блока ФНЧ. Следует отметить, что учет в модели данных аппаратных средств практически не влияет на точность получаемых результатов моделирования.

Характеристика цифровой дифференциальной защиты трансформатора с торможением

Работу дифференциальной защиты с торможением удобно анализировать с помощью диаграммы, ось абсцисс которой соответствует току торможения I_{res} , а ось ординат – дифференциальному току I_{diff} (рис. 2).

Характеристика ДЗТ с торможением обычно представляет собой три участка (зоны) с разными углами наклона к оси абсцисс. Область диаграммы, расположенная выше ломаной кривой, образованной тремя отрезками, соответствует наличию внутреннего повреждения (TRIP); область, расположенная ниже данной кривой, соответствует отсутствию повреждения в зоне (NO TRIP).

Следовательно, как только траектория рабочей точки, определяемая мгновенными координатами (I_{res}, I_{diff}) , которые рассчитываются в блоках формирования рабочих и тормозных токов (рис. 1), перемещается из области NO TRIP в область TRIP, дифференциальная защита фиксирует повреждение в защищаемой зоне. Условие фиксации повреждения для каждой фазы можно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} I_{diff} > I_{diff_min}; \\ I_{diff} > \text{slope}(I_{res} - I_{res_b}); \\ I_{diff} > \text{slope1}(I_{res} - I_{res_b1}), \end{cases}$$

где I_{diff_min} – минимальный порог срабатывания дифференциальной защиты; slope, slope1 – наклон второго и третьего участков характеристики цифровой ДЗТ соответственно; I_{res_b} , I_{res_b1} – координаты точки пересечения оси абсцисс со вторым и третьим наклонными участками.

Исследование работы цифровой дифференциальной защиты трансформатора

На основании вышеизложенных положений в среде MatLab-Simulink с использованием пакета расширения SimPowerSystems разработана комплексная модель исследования работы цифровой ДЗТ. Структурная схема модели приведена на рис. 3.

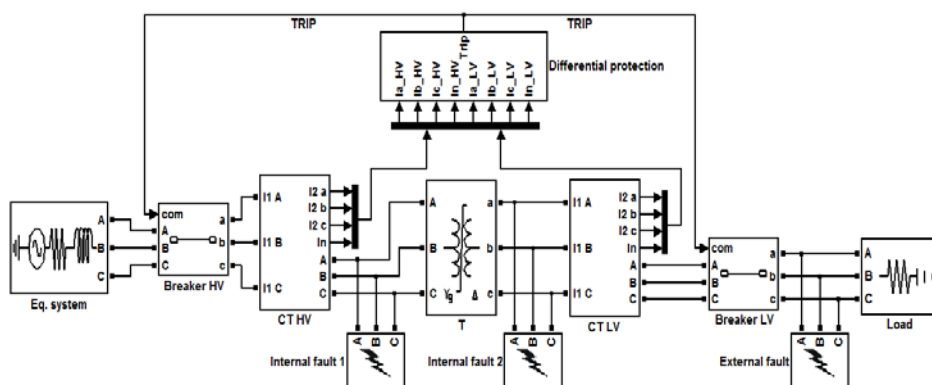


Рис. 3. Структурная схема модели исследования цифровой ДЗТ в MatLab-Simulink

Fig. 3. Digital differential protection research scheme in MatLab-Simulink environment

Схема модели включает в себя: источник питания (Eq. system), трехфазный силовой трансформатор (Т), трехфазные группы трансформаторов тока со стороны ВН (СТ HV) и НН (СТ LV) силового трансформатора, цифровую дифференциальную защиту (Differential protection), трехфазные силовые выключатели со стороны ВН (Breaker HV) и НН (Breaker LV) силового трансформатора, нагрузку (Load), блоки создания трехфазного КЗ в зоне действия ДЗТ (Internal fault 1 и Internal fault 2) и блок создания трехфазного КЗ вне зоны действия ДЗТ (External fault). Следует отметить, что все приведенные далее осциллограммы, диаграммы и формулы относятся к фазе А; время возникновения повреждения $t = 0$ с; рассматриваемое повреждение – трехфазное КЗ с наличием апериодической составляющей. Питание трансформатора осуществляется только со стороны ВН. Для возможности получения осциллограмм дифференциального и тормозного токов, а также траектории перемещения рабочей точки на протяжении всего времени моделирования действие цифровой ДЗТ на отключение силовых выключателей со сторон ВН и НН выведено. Будем считать, что команда на отключение выключателей начинает формироваться логикой защиты в момент перемещения рабочей точки из области NO TRIP в область TRIP с учетом наличия или отсутствия сигнала блокировки.

Внутренне повреждение силового трансформатора при отсутствии насыщения ТТ

Режим работы модели (рис. 3) для рассматриваемого случая: выключатели сторон ВН (Breaker HV) и НН (Breaker LV) включены, повреждение задается блоком создания трехфазного КЗ в зоне действия ДЗТ (Internal fault 1).

При внутреннем повреждении вследствие отсутствия подпитки места КЗ со стороны НН ($i_{LV} = 0$) токи протекают только со стороны ВН, поэтому величины I_{diff} и I_{res} имеют одинаковые значения, что и отображается на рис. 4б. Мгновенные координаты рабочей точки равны между собой: $I_{diff} = |i_{HV} + 0| = I_{res} = |i_{HV}| + |0|$, а траекторией ее перемещения является переходящая из области NO TRIP в область TRIP прямая наклонная линия,

изображенная на рис. 4а. Это свидетельствует о том, что цифровая ДЗТ правильно отработала в рассматриваемом режиме, т. е. сформировала команду на отключение силовых выключателей.

На рис. 4б также можно наблюдать характерный колебательный процесс при установлении действующего значения токов I_{diff} и I_{res} , связанный с недостаточным совершенством цифрового фильтра, реализующего одно-периодное дискретное преобразование Фурье при подаче на его вход непериодического сигнала – тока КЗ с наличием затухающей апериодической составляющей [10, 11].

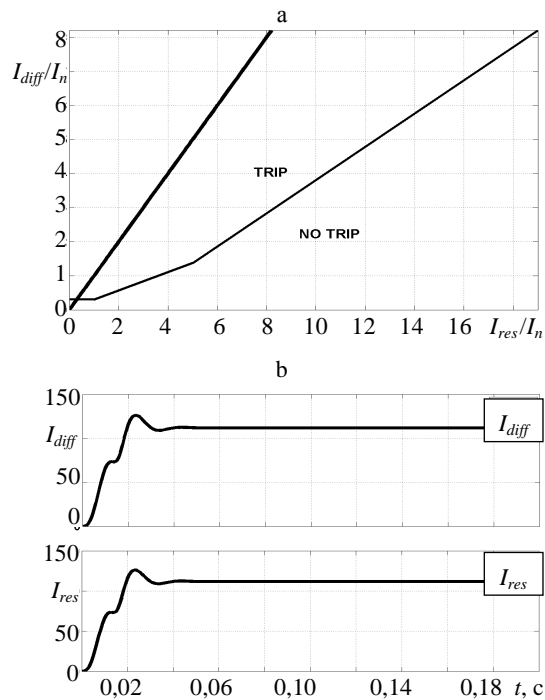


Рис. 4. Траектория перемещения рабочей точки при внутреннем повреждении (а); осциллограмма токов I_{diff} и I_{res} при внутреннем повреждении (б)

Fig. 4. Operating point trajectory during internal fault (a); I_{diff} and I_{res} currents waveform during internal fault (b)

Внешнее повреждение со стороны низшего напряжения силового трансформатора при отсутствии насыщения ТТ

Режим работы модели (рис. 3) для рассматриваемого случая: выключатели сторон ВН (Breaker HV) и НН (Breaker LV) включены, повреждение задается блоком создания трехфазного КЗ вне зоны действия ДЗТ (External fault). При данном виде повреждения токи со сторон ВН и НН равны между собой, но имеют разное направление протекания по отношению к защищаемому трансформатору: i_{HV} протекает «к защищаемому объекту», что принято за положительное направление, а i_{LV} протекает «от защищаемого объекта», что принято за отрицательное направление. Поэтому дифференциальный ток $I_{diff} = |i_{HV} - i_{LV}| = 0$, что и отображается на рис. 5б.

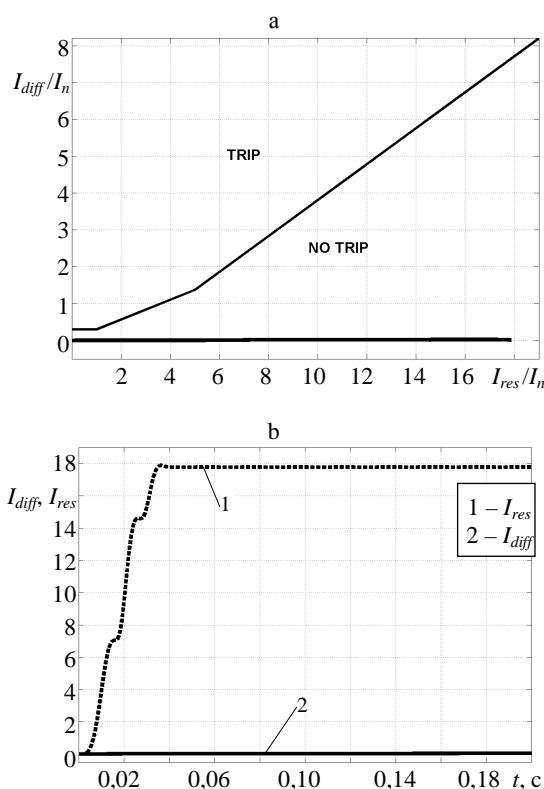


Рис. 5. Траектория перемещения рабочей точки при внешнем повреждении без насыщения ТТ (а); осциллограмма токов I_{diff} и I_{res} при внешнем повреждении без насыщения ТТ (b)

Fig. 5. Operating point trajectory during external fault without CT saturation (a); I_{diff} and I_{res} currents waveform during external fault without CT saturation (b)

Следует отметить, что ложный дифференциальный ток, появляющийся вследствие изменения положения отпаек РПН и при протекании намагничивающего тока трансформатора, на осциллограммах и диаграммах не показан. Траектория перемещения точки с мгновенными координатами (I_{res} , I_{diff}), приведенная на рис. 5а, представляет собой параллельную оси абсцисс линию. Как и ожидалось, срабатывания ДЗТ в данном режиме не произошло, т. е. команда на отключение силовых выключателей не была сформирована.

Внешнее повреждение со стороны низшего напряжения силового трансформатора, сопровождающееся насыщением ТТ

Для исключения ложной работы ДЗТ при насыщении ТТ уставка срабатывания увеличивается пропорционально протекающему сквозному току, что позволяет иметь высокую чувствительность при повреждениях, сопровождающихся небольшими токами, а также исключает излишнее срабатывание при внешнем КЗ из-за насыщения магнитной системы измерительных ТТ. Вышесказанное справедливо при правильном выборе измерительного ТТ и правильно заданной характеристике цифровой ДЗТ.

Режим работы модели (рис. 3) для рассматриваемого случая: выключатели сторон ВН (Breaker HV) и НН (Breaker LV) включены, повреждение задается блоком создания трехфазного КЗ вне зоны действия ДЗТ (External fault). В этом случае произошло излишнее срабатывание ДЗТ при внешнем КЗ. Причиной срабатывания является дифференциальный ток (рис. 6b), появившийся вследствие насыщения ТТ со стороны низшего напряжения силового трансформатора. Насыщение ТТ приводит к неполной трансформации первичного тока во вторичные цепи ТТ, что и дает нарушение равенства токов со сторон ВН и НН, т. е. дифференциальный ток $I_{diff} = |i_{HV} - i_{LV}| \neq 0$. В данном режиме значение I_{diff} в первый момент времени практически равно нулю, и рабочая точка перемещается вправо по оси абсцисс. Однако по мере насыщения ТТ происходит перемещение рабочей точки в область срабатывания, при этом ее траектория имеет характерную петлевидную форму, что отображено на рис. 6а.

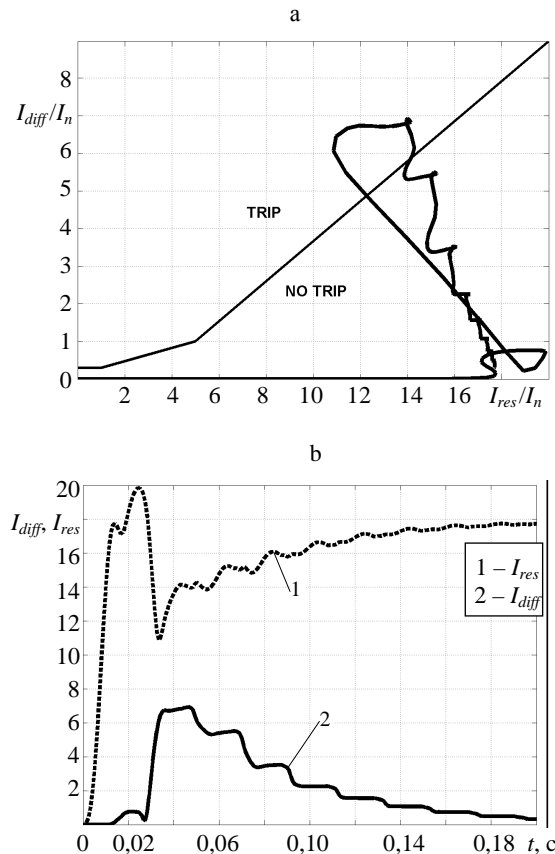


Рис. 6. Траектория перемещения рабочей точки при внешнем повреждении с насыщением ТТ (а); осциллограмма токов I_{diff} и I_{res} при внешнем повреждении с насыщением ТТ (b)

Fig. 6. Operating point trajectory during external fault with CT saturation (a); I_{diff} and I_{res} currents waveform during external fault with CT saturation (b)

Избежать излишнего срабатывания в данном случае можно следующими способами:

- 1) использовать ТТ с большей номинальной кратностью и (или) большей номинальной мощностью;
- 2) увеличить угол наклона третьего участка характеристики цифровой ДЗТ;
- 3) использовать специальные алгоритмы распознавания режима насыщения измерительных ТТ, которые блокируют работу цифровой ДЗТ или автоматически увеличивают наклон третьего участка характеристики до момента выхода ТТ из режима насыщения [8].

Режим перевозбуждения силового трансформатора

Режим перевозбуждения силового трансформатора возникает при определенном уровне повышения напряжения питания (относительно номинального) или при определенном уровне снижения его частоты (по отношению к номинальной), или при сочетании двух данных факторов. Данный режим сопровождается увеличением температуры конструктивных частей трансформатора, повышенным уровнем шума и вибрации.

Условие возникновения перевозбуждения со стороны обмотки ВН может быть описано следующим выражением [12]:

$$\frac{U}{f} > \left(\frac{U_{1\text{ном}}}{f_{\text{ном}}} \right) K,$$

где U – текущее напряжение питания обмотки ВН трансформатора; f – частота текущего напряжения питания обмотки ВН; K – значение в относительных единицах магнитного потока в точке излома характеристики намагничивания.

Выполнение данного условия приводит к повышению магнитного потока до значений, вызывающих насыщение стального магнитопровода трансформатора, что, в свою очередь, обуславливает резкое увеличение тока намагничивания, воспринимаемого ДЗТ в качестве дифференциального (рабочего) тока. Указанное обстоятельство может привести к ложному срабатыванию защиты, так как перевозбуждение трансформатора в течение определенного времени не является аварийным режимом. Следовательно, работа ДЗТ при возникновении данного режима должна быть заблокирована, а отключение трансформатора должно происходить от специальной защиты с зависимой от U/f выдержкой времени.

Рассмотрим случай повышенного напряжения питания при номинальной частоте. Режим работы модели (рис. 3) для рассматриваемого случая: выключатель стороны ВН (Breaker HV) включен, а выключатель стороны НН (Breaker LV) отключен. Для характеристики намагничивания моделируемого трехфазного трансформатора, заданной в соответствии с [3], резкое увеличение тока намагничивания будет происходить при превышении напряжением питания значения $1,15U_{1\text{ном}}$, при котором $K = 1,15$. Осцилло-

грамма вторичного тока фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН при питании обмотки ВН трехфазного силового трансформатора трехфазным напряжением величиной $1,35U_{\text{ном}}$ представлена на рис. 7.

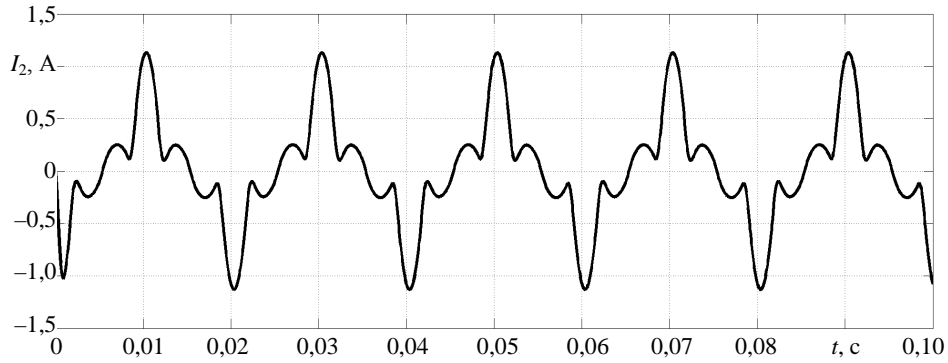


Рис. 7. Осциллограмма вторичного тока фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН при перевозбуждении трехфазного силового трансформатора

Fig. 7. A-phase secondary current waveform of the HV wye-connected CTs during three-phase power transformer overexcitation

Следует отметить, что режим перевозбуждения не сопровождается насыщением ТТ, так как протекающий через них ток имеет малую амплитуду и не содержит аperiodической составляющей. Поэтому ТТ не вносят дополнительных гармонических составляющих во вторичный ток.

Гармонический состав вторичного тока ТТ имеет ярко выраженное процентное содержание нечетных гармоник по отношению к основной. Как видно из табл. 2, доминирующими являются 3-, 5- и 7-я гармоники. Однако в зависимости от схемы соединения обмотки силового трансформатора в протекающем со стороны подачи напряжения токе может отсутствовать 3-я гармоника [13].

Таблица 2

Гармонический состав вторичного тока фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН при перевозбуждении трехфазного силового трансформатора

A-phase secondary current harmonic content of the wye-connected CTs on the HV side during three-phase power transformer overexcitation

| Номер гармоники | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----------------|-----|------|-------|------|-------|------|-------|------|-----|
| Содержание, % | 100 | 0,26 | 35,33 | 0,17 | 42,09 | 0,18 | 11,54 | 0,22 | 2,2 |

Принимая во внимание данную особенность, повышенное процентное содержание 5-й гармоники является наиболее достоверным показателем возникновения режима перевозбуждения. Поэтому блокирование работы ДЗТ при перевозбуждении силового трансформатора в цифровых устройствах защиты основано на сравнении процентного содержания 5-й гармоники с заданной уставкой. Характеристика изменения процентного содержания пятой гармоники ($I_5/I_1 \text{ ratio, \%}$) во времени приведена на рис. 8. После выделения цифровыми фильтрами за время, равное одному периоду про-

мышленной частоты процентного содержания 5-й гармоники, устанавливается ее истинное значение, которое превышает заданную уставку (threshold), что приводит к блокированию ДЗТ.

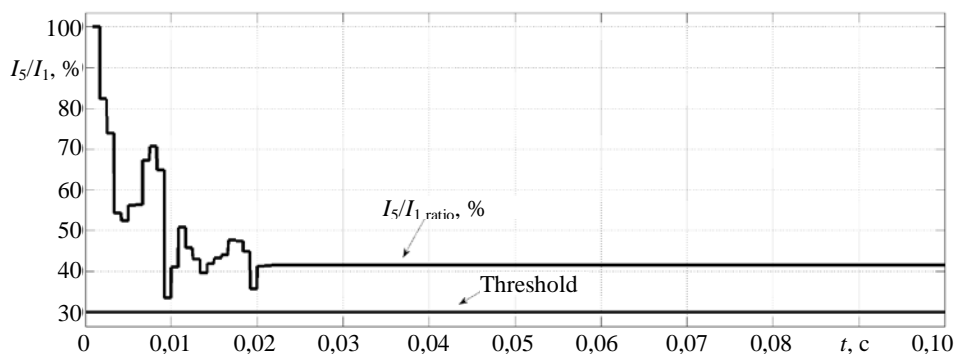


Рис. 8. Характеристика изменения процентного содержания 5-й гармоники во вторичном токе фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН при перевозбуждении трехфазного силового трансформатора

Fig. 8. A-phase secondary current fifth harmonic content (per cent of fundamental) of the HV wye-connected CTs during three-phase power transformer overexcitation

Бросок тока намагничивания

Данный режим, как и режим перевозбуждения, связан с резким возрастанием тока намагничивания силового трансформатора вследствие насыщения его магнитопровода. Причины возникновения броска тока намагничивания (БТН) в основном следующие: постановка ненагруженного трансформатора под напряжение, восстановление напряжения после ликвидации внешнего КЗ, включение параллельно работающего трансформатора.

Рассмотрим режим постановки ненагруженного трансформатора под напряжение со стороны ВН: выключатель стороны НН (Breaker LV) отключен, выключатель стороны ВН (Breaker HV) включается в момент подачи напряжения (рис. 3). В данном случае происходит скачкообразное изменение напряжения на зажимах силового трансформатора, что вызывает переходный процесс установления номинального магнитного потока. При этом результирующий магнитный поток будет являться суммой двух составляющих: установившейся и апериодической, затухающей с определенной постоянной времени. До момента затухания апериодической составляющей (установление номинального магнитного потока) значение результирующего магнитного потока может превосходить его номинальное значение, чем и обусловлено резкое возрастание тока намагничивания в данном режиме.

Максимальное значение БТН может превышать номинальный ток силового трансформатора в 5–10 раз [8]. Данное значение зависит от многих факторов: мощности трансформатора, постоянной времени питающей системы, фазы включения, остаточной намагниченности магнитопровода трансформатора, наклона характеристики намагничивания в области насыщения. Осциллограмма первичного (сплошная линия) и приведенного

вторичного (штриховая линия) тока фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН при трехфазном БТН представлена на рис. 9. Следует заметить, что в отличие от режима перевозбуждения БТН в каждой из фаз будет различен из-за отличия фаз напряжения в момент включения и, как следствие, разного значения аperiodической составляющей возникающего магнитного потока.

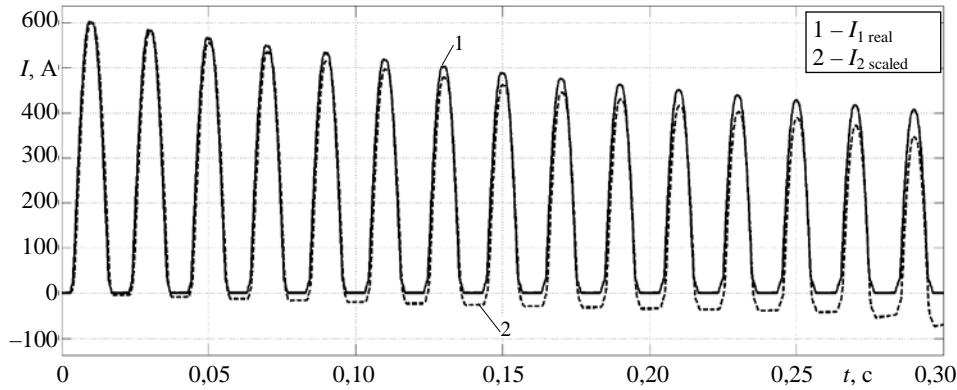


Рис. 9. Осциллограмма первичного тока (сплошная линия) и приведенного вторичного тока (штриховая линия) фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН при трехфазном БТН

Fig. 9. A-phase primary current (solid line) and scaled secondary current (dashed line) waveform of the HV wye-connected CTs during three-phase magnetizing inrush

Для рассматриваемого на рис. 9 режима в связи с наличием длительно затухающей аperiodической составляющей характерно насыщение измерительных ТТ, что и является причиной искажения трансформируемого первичного тока. Данный факт обуславливает некоторое различие в гармоническом составе первичного и вторичного токов ТТ.

В режиме БТН, как и при перевозбуждении, ДЗТ воспринимает возникающий ток намагничивания как ток внутреннего КЗ, так как бросок тока возникает только со стороны питания. Однако отключения трансформатора в данном режиме происходить не должно.

Гармонический состав 1-го периода представленного на рис. 9 вторичного тока фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН приведен в табл. 3. Как видно из табл. 3, преобладающими по отношению к основной являются четная 2-я и нечетная 3-я гармоники.

Таблица 3

Гармонический состав 1-го периода вторичного тока фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН при трехфазном БТН
A-phase 1st cycle secondary current harmonic content of the wye-connected CTs on the HV side during three-phase magnetizing inrush

| Номер гармоники | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----------------|-----|------|------|------|-----|------|-----|-----|------|
| Содержание, % | 100 | 20,2 | 10,7 | 1,74 | 2,6 | 1,28 | 1,2 | 0,6 | 0,02 |

Принимая во внимание, что процентное содержание 2-й гармоники – доминирующее по отношению ко всем остальным высшим гармоникам, содержащимся в рассматриваемом вторичном токе, и учитывая, что в зависимости от схемы соединения обмотки силового трансформатора со стороны питания 3-я гармоника может отсутствовать [13], то именно повышенное содержание 2-й гармоники является наиболее достоверным показателем возникновения режима БТН при неиспользовании в алгоритме иных признаков данного режима. Поэтому блокирование работы ДЗТ при БТН силового трансформатора в цифровых устройствах защиты основано на сравнении процентного содержания 2-й гармоники с заданной уставкой. Характеристика изменения процентного содержания 2-й гармоники (I_2/I_1 ratio, %) представленного на рис. 9 вторичного тока фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН при трехфазном БТН приведена на рис. 10. Вычисляемое процентное содержание превышает заданную уставку (threshold), что приводит к блокированию ДЗТ в режиме БТН. Следует отметить, что по мере затухания БТН процентное содержание 2-й гармоники увеличивается.

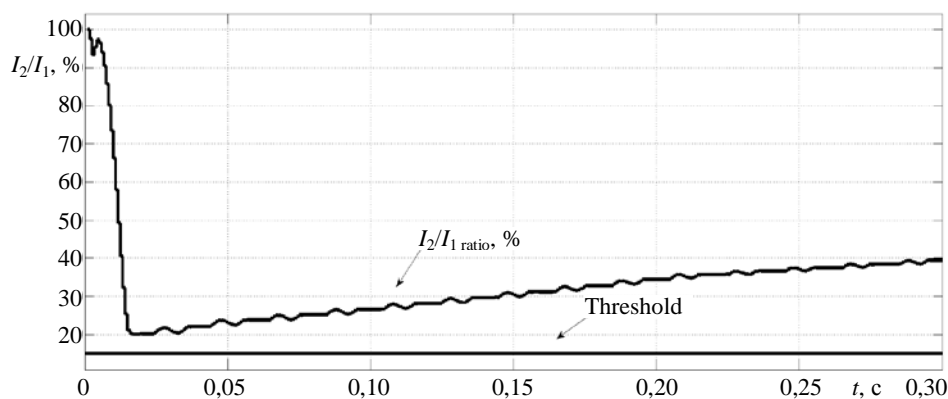


Рис. 10. Оциллограмма изменения процентного содержания 2-й гармоники во вторичном токе фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН при трехфазном БТН

Fig. 10. A-phase secondary current second harmonic content (per cent of fundamental) of the HV wye-connected CTs during three-phase magnetizing inrush

Недостатки алгоритмов блокировки, основанных на гармоническом анализе

Стоит отметить, что наличие высших гармоник не всегда свидетельствует о возникновении режима перевозбуждения или БТН. Так, при КЗ, сопровождающихся насыщением ТТ, в их вторичном токе появляются высшие гармоники (нечетные – при токе КЗ без апериодической составляющей, четные и нечетные – при ее наличии). Поэтому алгоритмы блокировки, основанные на гармоническом анализе тока, могут вызывать замедление срабатывания ДЗТ при внутренних КЗ. Оциллограмма вторичного тока фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН защищаемого трансформатора при их насыщении вследствие протекания тока КЗ с апериодической составляющей при внутреннем КЗ приведена на рис. 11.

Режим работы модели (рис. 3) для рассматриваемого случая: выключатели сторон ВН (Breaker HV) и НН (Breaker LV) включены, повреждение задается блоком создания трехфазного КЗ в зоне действия ДЗТ (Internal fault 1).

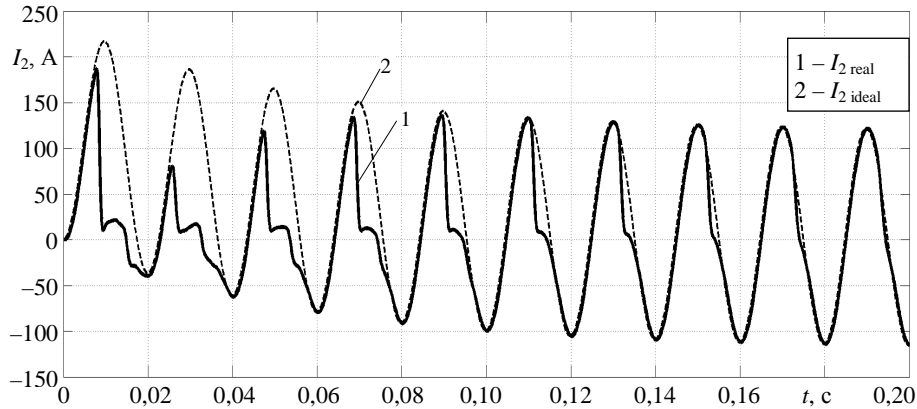


Рис. 11. Осциллограмма вторичного тока фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН при их насыщении вследствие протекания тока КЗ с аperiodической составляющей

Fig. 11. A-phase secondary current waveform of the HV wye-connected CTs in case of their saturation due to DC component presence in the short-circuit current

Характеристика изменения процентного содержания 2-й гармоники во вторичном токе фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН в рассматриваемом случае (рис. 11) приведена на рис. 12. Как видно из рис. 12, данный режим сопровождается ложным блокированием цифровой ДЗТ рассмотренным алгоритмом определения режима БТН. Время блокирования составляет около 0,155 с, или 7,75 периодов промышленной частоты.

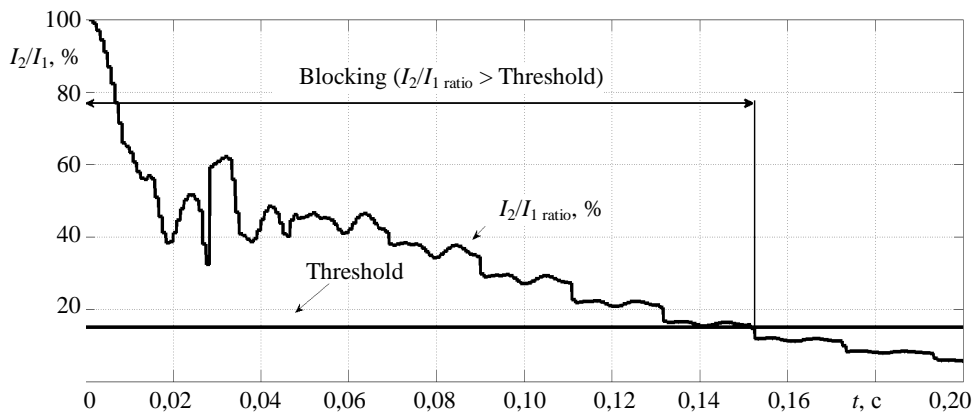


Рис. 12. Ложное блокирование работы ДЗТ при внутреннем КЗ, сопровождающимся насыщением ТТ, алгоритмом определения режима БТН

Fig. 12. False transformer differential protection operation blocking by “second harmonic blocking” algorithm in case of internal fault along with CT saturation

Для повышения надежности срабатывания цифровой ДЗТ следует использовать дополнительные способы идентификации аномальных режимов силового трансформатора, основанные, например, для режима БТН на: оценке отношения тока 2-й гармоники прямой последовательности к току основной гармоники обратной последовательности [14], оценке разности фаз между токами основной и 2-й гармоник [15] или идентификации режима по форме тока [16]. Перечисленные варианты в сочетании с традиционным способом блокировки по гармоническому составу позволят повысить быстродействие защиты при внутренних повреждениях, сопровождающихся насыщением измерительных ТТ.

ВЫВОДЫ

1. Приведено детальное описание всех стадий цифровой обработки и фильтрации входных сигналов в цифровой дифференциальной защите силового трансформатора.
2. Разработана комплексная модель, позволяющая исследовать большинство характерных режимов функционирования цифровой дифференциальной защиты силового трансформатора.
3. Продемонстрировано влияние насыщения измерительных трансформаторов тока на функционирование цифровой дифференциальной защиты силового трансформатора.
4. Рассмотрены алгоритмы блокировки цифровой дифференциальной защиты силового трансформатора при аномальных режимах его работы, отмечены их недостатки.
5. Полученные результаты моделирования свидетельствуют о возможности применения среды динамического моделирования MatLab-Simulink как для анализа функционирования существующих цифровых устройств релейной защиты, так и для разработки и проверки алгоритмов функционирования новых устройств цифровой релейной защиты на этапе внедрения в производство.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sim Power Systems. User's Guide. Version 5 [Electronic Resource] // The MathWorks, 2011. Mode of Access: http://www.mathworks.com/help/releases/R2011a/pdf_doc/physmod/powersys/powersys.pdf. Date of Access: 01.12.2015.
2. Румянцев, Ю. В. Исследование надежности срабатывания цифровой дифференциальной защиты трансформатора в системе динамического моделирования MatLab-Simulink / Ю. В. Румянцев // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 66: Актуальные проблемы надежности систем энергетики. Минск, 2015. С. 390–396.
3. Новаш, И. В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MatLab-Simulink с учетом насыщения магнитопровода / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. № 1. С. 12–24.
4. Королев, Е. П. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты / Е. П. Королев, Э. М. Либерзон. М.: Энергия, 1980. 207 с.

5. Романюк, Ф. А. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем / Ф. А. Романюк, В. И. Новаш. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1998. 174 с.
6. Новаш, И. В. Упрощенная модель трехфазной группы трансформаторов тока в системе динамического моделирования / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. № 5. С. 23–38.
7. Wye-Connected Current Transformers Simplified Model Validation in MatLab-Simulink / F. Romanyuk [et al.] // Przegląd Elektrotechniczny. 2015. Vol. 91, No 11. P. 292–295.
8. Ziegler, G. Numerical Differential Protection: Principles and Applications / G. Ziegler. 2 edition. Erlangen, Germany: Publicis Publishing, 2012. 287 p.
9. IEEE Guide for Protecting Power Transformers: IEEE Standard. C 37.91–2008.
10. Benmouyal, G. Removal of DC-Offset in Current Waveforms Using Digital Mimic Filtering / G. Benmouyal // IEEE Transactions on Power Delivery. 1995. Vol. 10, No 2. P. 621–630.
11. Перспективные технологии реализации микропроцессорных защит линий распределительных сетей / Ф. А. Романюк [и др.] // Перспективные материалы и технологии: в 2 т. / под ред. В. В. Клубовича. Витебск: ВГТУ, 2015. Т. 1. С. 115–139.
12. Paithankar, Y. G. Fundamentals of Power System Protection / Y. G. Paithankar, S. R. Bhide. New Delhi: Prentice-Hall of India Private Limited, 2003. 287 p.
13. Madzikanda, E. A Practical Look at Harmonics in Power Transformer Differential Protection / E. Madzikanda, M. Negnevitsky // 2012 IEEE International Conference on Power System Technology. POWERCON 2012. Auckland, New Zealand. Article Number 6401274.
14. Романюк, Ф. А. Исследование алгоритма блокировки токовых защит трансформатора в режимах броска тока намагничивания / Ф. А. Романюк, М. С. Ломан, А. С. Гвоздицкий // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2014. № 2. С. 5–10.
15. Kulidjian, A. New Magnetizing Inrush Restraining Algorithm for Power Transformer Protection / A. Kulidjian, B. Kasztenny, B. Campbell // IEEE Developments in Power Sys. Protec. Conf. 2001. P. 181–184.
16. Guzman, A. Power Transformer Protection Improvements with Numerical Relays / A. Guzman, H. Altuve, D. Tziouvaras // CIGRE Study Committee B5 – Protection and Automation. 2005. Vol. 11.

Поступила 16.02.2016 Подписана в печать 15.04.2016 Опубликовано онлайн 03.06.2016

REFERENCES

1. Sim Power Systems. User's Guide. Version 5. *The MathWorks* (2011). Available at: http://www.mathworks.com/help/releases/R2011a/pdf_doc/phymod/powersys/powersys.pdf. (Accessed: 1 December 2015).
2. Rumiantsev Yu. V. (2015) The Study of the Transformer Digital Differential Protection Operation Reliability in the MatLab-Simulink Environment. *The Methodic Problems of the Reliability of Large Systems of Power Production. Issue 66. Actual Problems of Reliability of Energy Systems*, 390–396 (in Russian).
3. Novash I. V., Rumiantsev Yu. V. (2015) Three-Phase Transformer Parameters Calculation Considering the Core Saturation for the MatLab-Simulink Transformer model. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (1), 12–24 (in Russian).
4. Koroliev Ye. P., Liberzon E. M. (1980) *Calculations of the Allowable Loads in the Current Circuits of Relay Protection*. Moscow, Energiya. 207 (in Russian).
5. Romanyuk F. A., Novash V. I. (1998) *Information Support of Computing Experiment in Relay Protection and Automatics of Power Production Systems*. Minsk, VUZ-UNITI. 174 (in Russian).
6. Novash I. V., Rumiantsev Yu. V. (2015) A Simplified Model of Three-Phase Bank of Current Transformers in the Dynamic Simulation System. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh*

- Zavedenii i Energeticheskikh Obединenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (5), 23–38 (in Russian).
7. Romanyuk F. A., Novash I., Rumiantsev Yu., Węgierek P. (2015) Wye-Connected Current Transformers Simplified Model Validation in MatLab-Simulink. *Przegląd Electrotechniczny*, 91 (11), 292–295. DOI: 10.15199/48.2015.11.67.
 8. Ziegler G. (2012) *Numerical Differential Protection: Principles and Applications*. 2 ed. Erlangen, Germany, Publicis Publishing. 287.
 9. IEEE Guide for Protecting Power Transformers: IEEE Standard C 37.91–2008.
 10. Benmouyal G. (1995) Removal of DC-Offset in Current Waveforms Using Digital Mimic Filtering. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 10 (2), 621–630. DOI: 10.1109/61.400869.
 11. Romaniuk F. A., Novash I. V., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V. (2015) Perspective Technologies in the Distribution Lines Digital Protection. V. V. Klubovich (ed.) *Prospective Materials and Technologies*. Vol. 1. Vitebsk: VSTU, 115–139 (in Russian).
 12. Paithankar Y. G., Bhide S. R. (2003) *Fundamentals of Power System Protection*. New Delhi, Prentice-Hall of India Private Limited. 287.
 13. Madzikanda E. A., Negnevitsky M. (2012) Practical Look at Harmonics in Power Transformer Differential Protection. *2012 IEEE International Conference on Power System Technology. POWERCON 2012*. Auckland, New Zealand. Article Number 6401274. DOI: 10.1109/PowerCon.2012.6401274.
 14. Romaniuk F. A., Loman M. S., Gvozditskiy A. S. (2014) Investigation of Blocking Algorithm for Transformer Current Protections in Magnetizing Inrush Current Modes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obединenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (2), 5–10 (in Russian).
 15. Kulidjian A., Kasztenny B., Campbell B. (2001) New Magnetizing Inrush Restraining Algorithm for Power Transformer Protection. *IEEE Developments in Power Sys. Protec. Conf.*, 181–184.
 16. Guzman A., Altuve H., Tziouvaras D. (2005) Power Transformer Protection Improvements with Numerical Relays. *CIGRE Study Committee B5 – Protection and Automation*. Vol. 11.

Received: 16.02.2016

Accepted: 15.04.2016

Published online: 03.06.2016