

Distinctive Features of Faults for Use in Power Transformer Differential Protection

Glazyrin V.E., Litvinov I.I.
Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract. The aim of the work is to study the change in instantaneous values of the differential current in power transformer differential protection circuits under conditions of magnetizing inrush when the unloaded transformer is energized and under conditions of a fault within the protection zone. Saturation of measuring current transformers during the transient process leads to distortion of signals in their secondary windings, which can cause a long delay in the disconnection of the protected object and the development of an accident in the power system if traditional protective algorithms are used. Taking into account the peculiarities of the change in the instantaneous values of the differential current while developing the protection algorithm makes it possible to recognize faults with maximum speed before the moment of the first saturation of electromagnetic current transformers and thus avoid a delay in the operation of the protection. For quick and correct recognition of a fault within the protection zone authors proposed to monitor the maximum value of the derivative of the differential current and the duration of its monotonous change from the moment of the onset of the transient process. This is because the monitored parameters in the emergency and normal operation of the power transformer can vary significantly. Application of traditional protection algorithms together with proposed methods allows increasing the speed of differential protection response in different operation modes of the power system. Mathematical simulation has been used to study the magnetizing inrush and short circuits within the protection zone.

Keywords: relay protection, power transformer differential protection, power transformer inrush current, transients, simulation, distinctive features of faults.

Semne ale regimurilor de avarie în circuitele protecției diferențiale ale transformatoarelor de putere

Glazârin V.E., Litvinov I.I.
Universitatea Națională Tehnică de Stat din Novosibirsk
Novosibirsk, Federația Rusă

Rezumat. Lucrarea are ca obiectiv cercetarea caracterului devierii valorilor instantanee ale curentului diferențial în circuitele de protecție diferențială ale transformatorului de putere în regimul de vârf a curentului de magnetizare la racordarea transformatorului fără sarcină la rețea și în regim de scurtcircuit în zona de acțiune a protecției. Saturarea transformatoarelor de curent în regimul tranzitoriu distorsionează semnalele în înfășurările secundare ale acestora, ceea ce în cazul utilizării algoritmilor de protecții convenționale pot provoca o întârziere semnificativă a procesului de deconectare a obiectului protejat și dezvoltarea accidentului în sistemul energetic. Luarea în considerare a caracterului curentului diferențial la elaborarea algoritmului de protecție permite să se depisteze rapid regimurile de avarie până la prima fază de saturare a miezului feromagnetic al transformatorului de curent prin ce se asigură excluderea întârzierii privind acționarea protecției. Pentru recunoașterea rapidă și corectă a regimului de funcționare a transformatorului de putere se propune controlul valorii maxime a primei derivate a curentului și durata variației sale monotone de la începutul procesului tranzitoriu. Aceasta este o consecință a faptului, că s-a stabilit, că valorile parametrilor controlați în regim normal și de avarie pot să difere esențial. S-a demonstrat, că utilizarea combinată a algoritmilor tradiționali de protecție și a metodei propuse poate îmbunătăți reacția protecției în condițiile de încărcare maximală și minimală a sistemului energetic. Cercetarea particularităților evoluției valorilor de vârf ale curentului de magnetizare și de scurtcircuit în zona de acțiune a protecției transformatorului de putere s-a realizat prin simulări matematice.

Cuvinte-cheie: protecția prin releu, protecție diferențială a unui transformator de putere, salt al curentului de magnetizare, proces tranzitoriu, simulare matematică, semne a regimului accidentat.

Признаки аварийных режимов в цепях дифференциальных защит силовых трансформаторов

Глазырин В.Е., Литвинов И.И.
Новосибирский государственный технический университет (НГТУ)
Новосибирск, Россия

Аннотация. Целью работы является исследование характера изменения мгновенных значений дифференциального тока в цепях дифференциальной защиты силового трансформатора в режиме броска

тока намагничивания при включении ненагруженного трансформатора под напряжение и в режиме короткого замыкания в зоне действия защиты. Насыщение измерительных трансформаторов тока в переходном процессе приводит к искажению сигналов в их вторичных обмотках, что при использовании традиционных защитных алгоритмов может обусловить длительную задержку в отключении защищаемого объекта и развитие аварии в энергосистеме. Учёт же особенностей изменения мгновенных значений дифференциального тока при построении алгоритма защиты позволяет с максимальным быстродействием распознать аварийные режимы до момента первого насыщения электромагнитных трансформаторов тока и тем самым избежать задержки в срабатывании защиты. Для быстрого и корректного распознавания режимов работы силового трансформатора предлагается контролировать максимальное значение производной дифференциального тока и длительность его монотонного изменения с момента начала переходного процесса, так как проведённые в работе исследования показывают, что контролируемые параметры в аварийном и нормальном режиме работы силового трансформатора могут существенно различаться. Показано, что совместное применение традиционных алгоритмов защиты и предложенной методики позволяет повысить быстродействие защиты в максимальных и минимальных режимах работы энергосистемы. Для исследования режимов броска тока намагничивания и короткого замыкания в зоне защиты использовалось математическое моделирование.

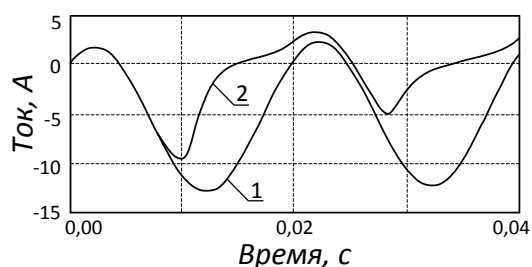
Ключевые слова: релейная защита, дифференциальная защита силового трансформатора, бросок тока намагничивания, переходные процессы, моделирование, признаки аварийных режимов.

Введение

В современных дифференциальных защитах (ДЗ) силовых трансформаторов (СТ) часто используется блокировка второй гармоникой дифференциального тока для обеспечения несрабатывания ДЗ от токов небаланса в переходных режимах внешних коротких замыканий (КЗ) и в режиме броска тока намагничивания (БТН) [1, 2]. Этот способ позволяет снизить начальный ток срабатывания ДЗ до уровня $0,3I_{номСТ}$, где $I_{номСТ}$ — номинальный ток СТ, что делает ДЗ чувствительной к развивающимся витковым замыканиям в обмотках СТ. Однако в случае использования электромагнитных трансформаторов тока (ТТ) со стальным сердечником возможно появление высших гармоник токов в цепях защиты из-за их насыщения апериодической слагающей первичного тока в ходе аварийного переходного процесса (ПП). Проведенные в [3] исследования показывают, что при КЗ внутри зоны действия защиты и насыщении ТТ содержание второй гармоники в дифференциальном токе оказывается настолько велико, что может приводить к длительному блокированию ДЗ при КЗ в зоне защиты. В связи с этим необходима разработка более эффективных методов, обеспечивающих достоверное распознавание режимов БТН и внутреннего КЗ с целью устранения задержек срабатывания и снижения чувствительности защиты, так как использование измерительных ТТ без стального сердечника не всегда экономически целесообразно.

Поскольку из-за насыщения измерительных ТТ происходит искажение отличительных признаков аварийных и нормальных режимов, необходимо по возможности осуществлять распознавание режима до момента первого насыщения ТТ (в период идеальной трансформации ТТ), анализируя характер изменения мгновенных значений дифференциального тока. Для достижения этой цели необходимо использовать количественные и качественные признаки аварийных и нормальных режимов, проявляющиеся *до первой смены знака производной дифференциального тока*, поскольку после указанного события информация о токе в общем случае становится недостоверной: смена знака производной может быть вызвана как естественным переходом сигнала через пиковое значение в условиях отсутствия насыщения ТТ (рис.1, первая полуволна тока в первом периоде ПП), так и насыщением ТТ и срывом сигнала тока до момента достижения периодического тока своего пикового значения (рис.1, вторая полуволна тока в первом периоде ПП). Как указывается в [1, 2], внутреннее повреждение может быть определено в первом полупериоде ПП по факту значительного роста мгновенных значений дифференциального тока при относительно небольшом росте мгновенных значений сквозного тока, однако применение данной методики для организации ДЗ СТ не столь эффективно, так как признаки аварийного режима возникают при включении СТ под напряжение или при

восстановлении питания после отключения внешнего КЗ со стороны питающей энергосистемы [4]. Следовательно, необходимы разработка и экспериментальное исследование новых отличительных признаков аварийных и нормальных режимов работы СТ с целью быстрого и селективного отключения защищаемого объекта в случае возникновения повреждения в зоне защиты.



1 – приведённый ко вторичной обмотке первичный ток ТТ, 2, – ток во вторичной обмотке ТТ.

Рис.1. Токи ТТ в условиях насыщения магнитного сердечника.

I. ОПИСАНИЕ ОТЛИЧИТЕЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ АВАРИЙНЫХ И НОРМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ

Для достоверного распознавания указанных режимов в самом начале переходного процесса можно предложить следующие признаки. Применение предлагаемых признаков в целом должно повысить эффективность работы ДЗ СТ, поскольку при любых обстоятельствах использование этих признаков не приводит к ложному отключению СТ в режиме БТН.

В соответствии с [4, 5], при трёхфазном БТН ток в обмотках реле (дифференциальный ток) всегда близок по форме к смещённой и обрезанной синусоиде с основанием до 265 электрических градусов (эл.град.). Аварийный ток КЗ в общем случае синусоидален и смещён по оси токов за счёт наличия апериодической составляющей. По этой причине, для выявления внутреннего КЗ достаточно контролировать длительность возрастания (или убывания) дифференциального тока от нулевого значения до момента смены знака первой производной. Если эта длительность превышает максимальную длительность роста модуля тока для БТН, приблизительно равную, согласно [5], 7,36 мс (что соответствует 132,5 эл.град.), следовательно,

текущий режим работы СТ — это режим внутреннего КЗ.

Однако этот признак может не проявиться при внутреннем КЗ, если происходит быстрое насыщение ТТ в первом полупериоде ПП и смена знака производной тока возникает ранее указанного времени. Кроме того, длительный рост модуля дифференциального тока возможен лишь в случае наличия в токе повреждения значительной апериодической составляющей (выполнение этого признака можно продемонстрировать на примере, приведённом далее на рис.2, где длительность возрастания дифференциального тока в фазе А составляет 8,2 мс), а при отсутствии апериодической составляющей длительность роста синусоидального тока оказывается меньше 7,36 мс. Поэтому данный признак следует использовать совместно со следующим.

Максимальное мгновенное значение тока при БТН в относительных единицах (относительно номинальных параметров СТ) $i_{inrush,max*}$ можно определить расчётным путём по формуле [4, 5, 6]:

$$i_{inrush,max*} = \frac{i_{inrush,max}}{\sqrt{2}I_r} = \frac{U_{max*}}{X_{T*}}(1+A), \quad (1)$$

где $i_{inrush,max}$ — пиковое значение тока намагничивания при БТН (А);
 I_r — номинальный ток СТ (А);
 U_{max*} — максимальное напряжение, подведённое к СТ (о.е.);
 X_{T*} — эквивалентное индуктивное сопротивление СТ при включении (о.е.);
 A — относительное смещение оси синусоиды потокосцепления по отношению к точке перегиба характеристики намагничивания.

Выражение (1) можно использовать для расчёта пиковых значений БТН как при однофазном, так и при трёхфазном включении, при этом параметр X_{T*} в знаменателе формулы должен соответствовать виду включения. Значения X_{T*} таковы [6], что при однофазном и трёхфазном включении СТ со стороны ВН амплитудное значение БТН всегда меньше амплитудного значения аварийного тока при КЗ за сопротивлением СТ. Это объясняется отсутствием размагничивания сердечника в режиме БТН, когда индуктивное сопротивление, ограничивающее пиковое значение тока, складывается из

индуктивности рассеяния при КЗ и индуктивности рассеяния обмотки НН при насыщенном сердечнике. По этой причине при КЗ дифференциальный ток возрастает существенно быстрее, чем при БТН. То есть имеется принципиальная возможность распознавать БТН и внутреннее КЗ по скорости изменения дифференциального тока во времени.

Очевидно, что для надёжной отстройки от воздействия помех необходимо, чтобы защита не срабатывала по двум предложенным признакам в случае, если мгновенное значение дифференциального тока не превышает некоторое фиксированное значение, определяющее требуемую помехозащищённость.

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЛОЖЕННЫХ ПРИЗНАКОВ

Рассмотрим характер изменения дифференциального тока при БТН и внутреннем КЗ на примере СТ типа ТДЦ-125000/110. Номинальные параметры рассматриваемого СТ следующие: номинальное напряжение стороны ВН $U_{HV} = 121$ кВ, номинальный ток на стороне ВН $I_r = 600$ А, номинальное активное сопротивление $R_T = 0,37$ Ом, напряжение короткого замыкания $u_{sc,\%} = 10,5$ %, что соответствует индуктивному сопротивлению $X_T = 12,3$ Ом.

Рассмотрению подлежат КЗ за сопротивлением СТ, поскольку внутренние КЗ перед СТ не ограничиваются его сопротивлением и без задержки распознаются дифференциальной токовой отсечкой [1]. При моделировании тока КЗ аperiodическая слагающая в одной из фаз принята максимально возможной, так как только в этом случае возможно быстрое насыщение ТТ при правильно выбранной его нагрузке. В соответствии с [6], для всех случаев включения СТ параметр A в формуле (1) принят наибольшим из возможных и равным 0,39, значение эквивалентного индуктивного сопротивления в режиме БТН для однофазного включения СТ выбранного типа со стороны ВН $X_{T(1)^*}$ принято равным 0,237, сопротивление для трёхфазного включения $X_{T(3)^*}$ принято равным 0,35, значение U_{\max}^* принято равным 1. При принятых параметрах рассматриваемого СТ максимально

возможная амплитуда однофазного БТН $i_{inrush,max(1)}$ составляет (в о.е.):

$$i_{inrush,max(1)^*} = \frac{U_{\max}^*}{X_{T(1)^*}}(1+A) = \frac{1 \cdot 1,39}{0,237} = 5,87. \quad (2)$$

Тогда при $I_r = 600$ А в именованных единицах имеем

$$i_{inrush,max(1)} = i_{inrush,max(1)^*} I_r \sqrt{2} \approx 5,0 \text{ кА}. \quad (3)$$

В то же время при трёхфазном включении максимально возможная амплитуда БТН $i_{inrush,max(3)^*}$ для этого же СТ (в о.е.) составляет:

$$i_{inrush,max(3)^*} = \frac{U_{\max}^*}{X_{T(3)^*}}(1+A) = \frac{1 \cdot 1,39}{0,35} \approx 4,0, \quad (4)$$

то есть

$$i_{inrush,max(3)} = i_{inrush,max(3)^*} I_r \sqrt{2} \approx 3,39 \text{ кА}. \quad (5)$$

Действующее значение аварийного тока при симметричном КЗ за сопротивлением СТ I_{fault}^* (в о.е.) при питании места повреждения со стороны ВН составляет:

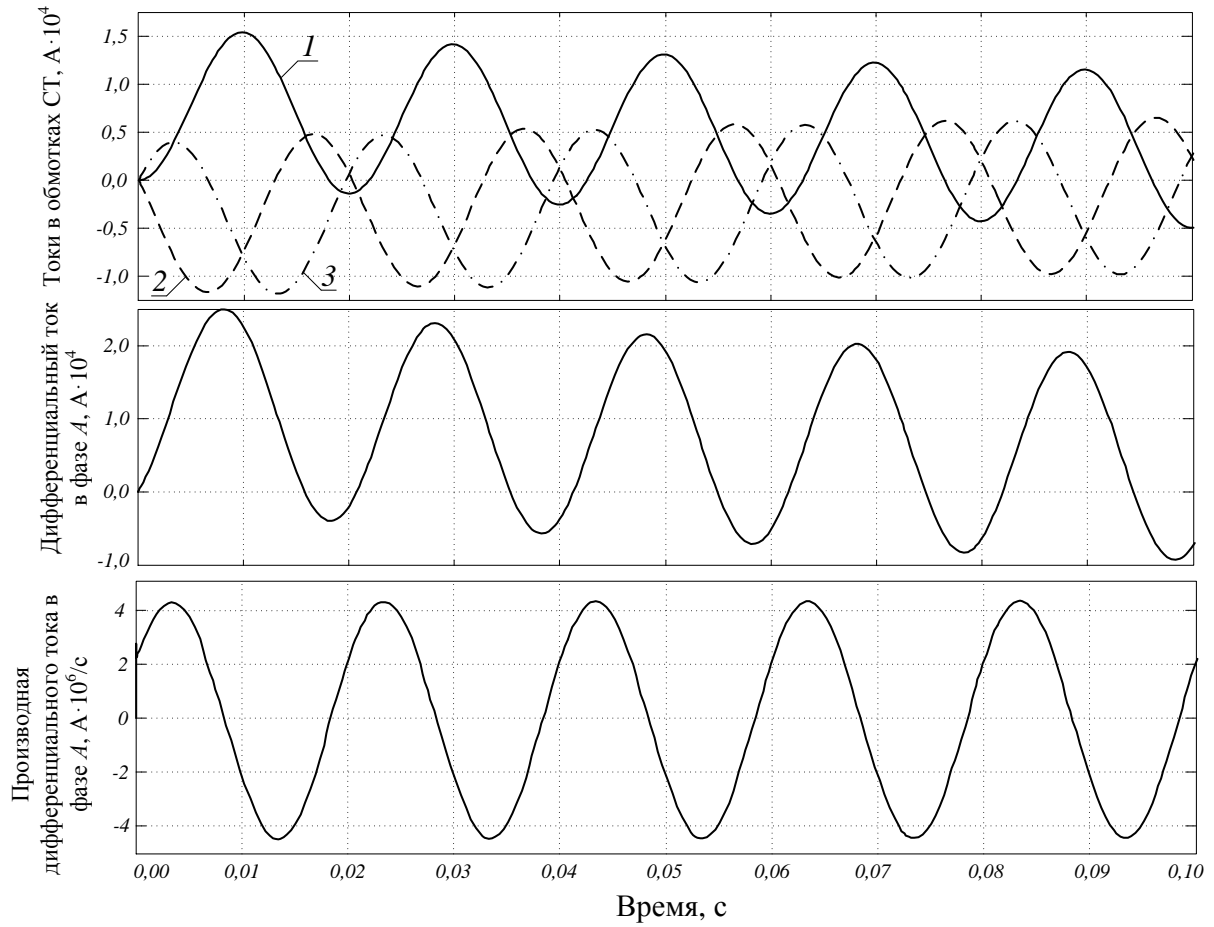
$$I_{fault}^* = \frac{U_{\max}^*}{u_{sc,\%} / 100\%} = \frac{1}{0,105} = 9,52. \quad (6)$$

Следовательно, максимальное мгновенное значение аварийного тока i_{fault} :

$$i_{fault} = I_{fault}^* I_r \sqrt{2} = 9,52 \cdot 600 \sqrt{2} = 8,08 \text{ кА}. \quad (7)$$

Постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ при указанных ранее значениях R_T , X_T приблизительно равна 0,1 с, а соответствующее значение ударного тока КЗ равно 15,43 кА.

Средствами моделирования рассмотрены следующие режимы БТН: 1) однофазный БТН с амплитудным значением $i_{inrush,max(1)}$; 2) трёхфазные БТН I и II типа по классификации [4] (соответственно БТН с максимальным периодическим и аperiodическим током в одной из фаз) с максимальной амплитудой, равной $i_{inrush,max(3)}$. При рассмотрении БТН использовалась математическая модель [7]. При моделировании КЗ амплитуда



1,2,3 – токи аварийного режима при КЗ за СТ соответственно в фазах А, В, С.

Рис. 2. Характер изменения токов в режиме КЗ.

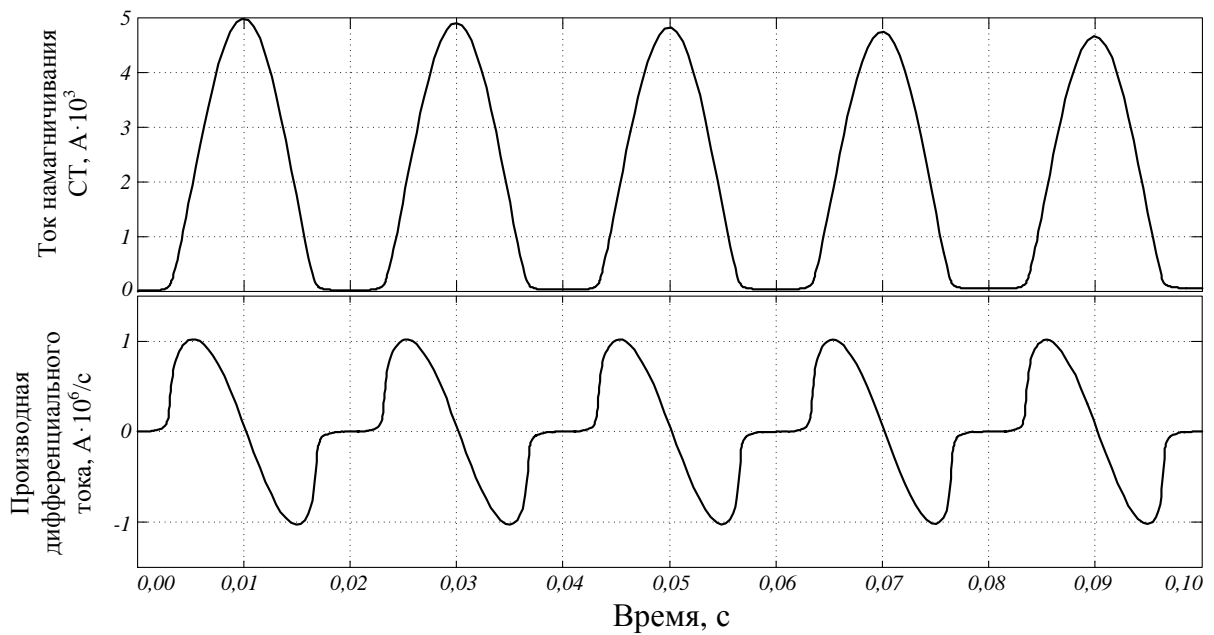
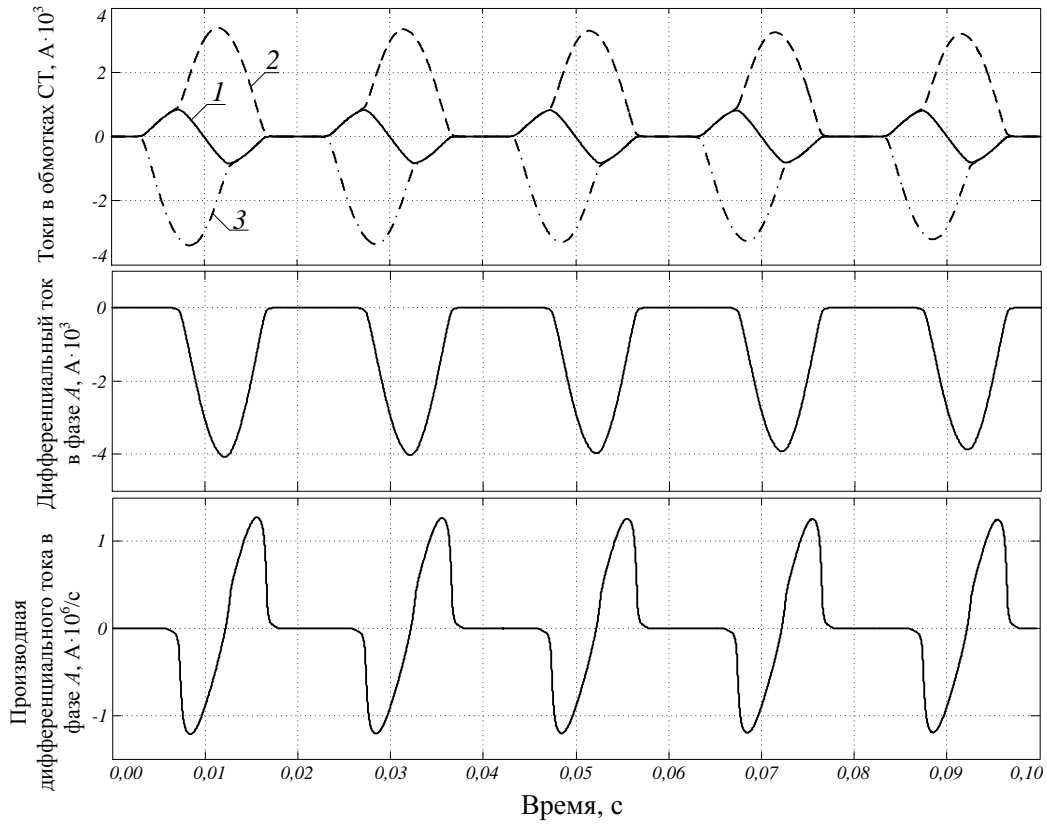
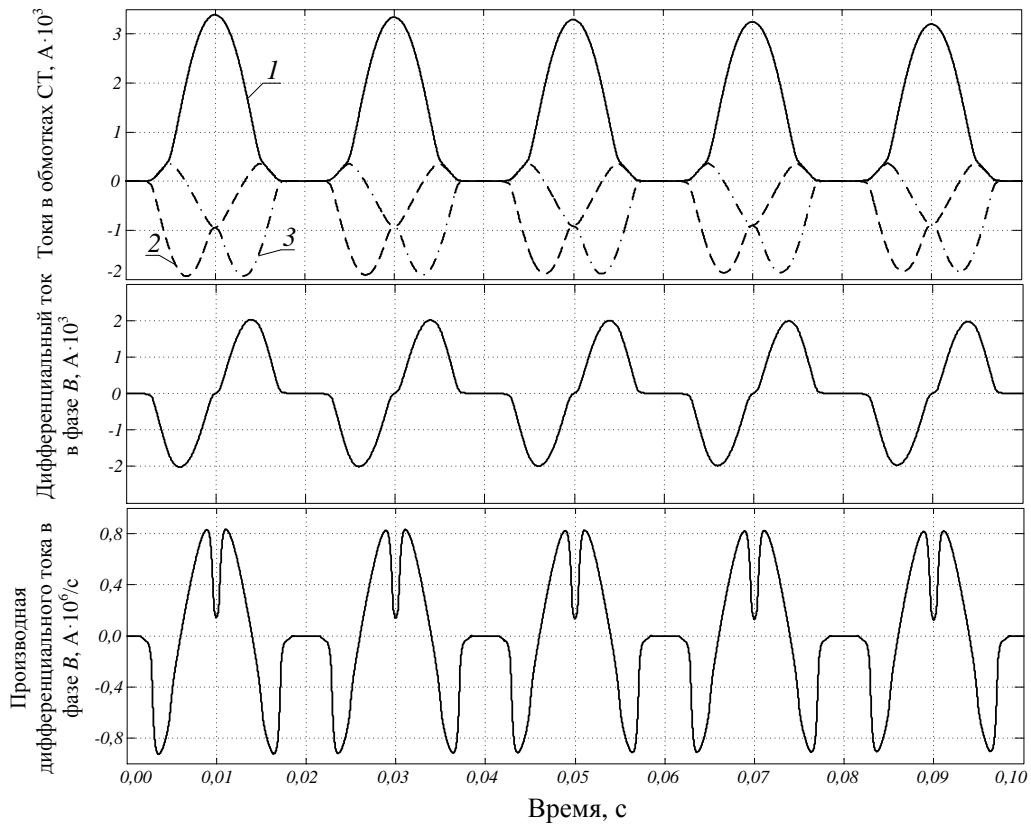


Рис. 3. Характер изменения тока в режиме однофазного БТН.



1,2,3 – токи намагничивания СТ соответственно в фазах A,B,C.

Рис. 4. Характер изменения токов в режиме БТН I типа.



1,2,3 – токи намагничивания СТ соответственно в фазах A,B,C.

Рис. 5. Характер изменения токов в режиме БТН II типа.

аварийного тока в первом периоде ПП в фазе с максимальной аperiodической составляющей принята равной рассчитанному выше ударному току. Режим холостого хода СТ принят за режим, предшествующий КЗ.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты моделирования приведены на рис.2, 3, 4, 5 (для наглядности на рисунках показан дифференциальный ток и его производная только в одной из фаз). Показано, что максимальное значение скорости изменения дифференциального тока при БТН не превышает $1,3 \cdot 10^6$ А/с (токи приведены к стороне ВН СТ). В то же время при тех же условиях в режиме КЗ максимальное значение производной существенно выше — $4,3 \cdot 10^6$ А/с, и уже в начале ПП для рассматриваемой фазы значение производной превосходит максимальное значение производной при БТН — $2,3 \cdot 10^6$ А/с (для некоторых фаз в этом режиме максимальное значение производной достигается в самом начале ПП). Таким образом, имеется принципиальная возможность выявления внутреннего повреждения в самом начале ПП, то есть до первого насыщения ТТ (быстрому определению режима способствует тот факт, что производная дифференциального тока достигает своего пикового значения раньше, чем сам дифференциальный сигнал). Для этого необходимо обеспечить отстройку защиты от максимального значения производной дифференциального тока в режиме БТН. Воспроизведение ПП в СТ разного типа для определения производной дифференциального тока и выбора уставки защиты может быть осуществлено с помощью математической модели [7] и указаний по расчёту БТН, приведённых в [5].

Отметим, что предложенный способ не столь эффективен при включении СТ со стороны низшего (среднего) напряжения, так как амплитудное значение БТН в этом случае может оказаться сопоставимо с амплитудой тока при КЗ, однако это не вносит существенных сложностей, поскольку включение СТ осуществляется, как правило, именно со стороны высшего напряжения. В то же время представляется целесообразным блокировать срабатывание ДЗ по этому признаку в случае, если дифференциальный

ток формируется токами плеч защиты со стороны низшего (среднего) напряжения СТ, когда не исключено включение СТ с соответствующей стороны.

Эффективное применение признака подразумевает его использование только в тех режимах, когда исключена его ложная работа. Чтобы обеспечить недействие защиты при внешних КЗ, когда возрастает переходный ток небаланса (значение тока небаланса может быть в пределе равно дифференциальному току при внутреннем КЗ [8], а потому возможно ложное отключение СТ в этом режиме), целесообразно осуществлять временную блокировку действия защиты по этому признаку в случае фиксации внешнего повреждения по описанному в [1, 2] методу, когда внешнее повреждение фиксируется по факту существенного роста сквозного тока при относительно небольшом росте дифференциального тока в первые моменты ПП.

Применение указанного признака позволяет максимально быстро выявлять наиболее тяжёлые аварии СТ. В минимальном режиме работы энергосистемы значения производной дифференциального тока при КЗ могут оказаться сопоставимыми с производной дифференциального тока при максимальных БТН, что снижает эффективность применения предложенного метода. Однако снижение аварийных токов уменьшает вероятность насыщения ТТ., следовательно, в этом случае аварийный режим может быть достоверно определён с помощью гармонического анализа, а значит, должно осуществляться совместное применение традиционного подхода к построению ДЗ с предложенными признаками аварийных и нормальных режимов.

Выводы

Предложены отличительные признаки идентификации режима БТН и внутреннего КЗ для ДЗ СТ. Применение данных признаков при построении ДЗ СТ даёт возможность повысить качество работы защиты за счёт уменьшения времени распознавания режима работы защищаемого объекта, при этом целесообразно совместное использование предложенных способов идентификации режима вместе с существующими методами.

Литература (References)

- [1] Ziegler G. *Numerical Differential Protection: Principles and Applications*. 1st ed. Wiley, 2005. 260 p. (Russ.ed.: Tsigler G. *Tsifrovye ustroystva differencial'noj zashchity. Printsipy i oblast' primenenija*. Moscow, Energoizdat Publ., 2005. 273 p.)
- [2] Shneerson E.M. *Tsifrovaja releynaja zashchita [Numerical Relay Protection]*. Moscow: Energoatomizdat, 2007. 549 p.
- [3] Kuparev M.A. Garmonicheskij analiz tokov vnutrennih korotkih замыканий differencial'noj zashchity transformatora [Harmonic analysis of the currents in power transformer differential protection circuits in conditions of internal faults]. *ELEKTRO. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaja promyshlennost' – ELEKTRO. Electrical engineering, electric power industry, electrotechnical industry*, 2007, no.3, pp. 15-18. (In Russian).
- [4] Zasyplin A.S. *Releynaja zashchita transformatorov [Differential protection of power transformers]*. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 240 p.
- [5] Drozdov A.D. *Elektricheskie tsepi s ferromagnitnymi serdechnikami v releynoj zashchite [Electric circuits with ferromagnetic cores in relay protection]*. Moscow-Leningrad: Energiya, 1965. 240 p.
- [6] *Rukovodjashhie ukazaniya po releynoj zashchite. Vyp. 12. Tokovaja zashchita nulevoj posledovatel'nosti ot замыканий na zemlju linii 110-500 kV. Raschjoty [Guidelines for relay protection. Issue 12. Current zero sequence protection against earth faults in 110-500 kV lines. Calculations]*. Moscow: Energiya, 1980. 88 p.
- [7] Litvinov I.I., Glazyrin V.E. Sostavlenie matematicheskoy modeli silovogo transformatora pri ego vkljuchenii pod naprjazhenie i opredelenie chislennyh parametrov modeli [Development of a mathematical model of a power transformer when it is energized and determining the numerical parameters of the model]. *ELEKTRO. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaja promyshlennost' – ELEKTRO. Electrical engineering, electric power industry, electrotechnical industry*, 2017, no.1, pp.18-24. (In Russian).
- [8] Baginskiy L. V. *Osnovnye osobennosti prodol'nyh differencial'nyh zashchit elektrooborudovanija elektrostancij i podstancij [The main features of longitudinal differential protection of electrical equipment of power plants and substations]*. Novosibirsk: Publishing house of NSTU, 2005. 66 p.

Сведения об авторах.



Глазырин Владимир Евлампиевич, к.т.н., доцент кафедры «Электрические станции» факультета Энергетики (ФЭН) в Новосибирском государственном техническом университете (НГТУ).

Область научных интересов: релейная защита и автоматика энергосистем.

E-mail: glazirin.ve@power.nstu.ru



Литвинов Илья Игоревич, аспирант, ассистент кафедры «Электрические станции» факультета Энергетики (ФЭН) в Новосибирском государственном техническом университете (НГТУ).

Область научных интересов: релейная защита и автоматика энергосистем, математическое моделирование объектов энергетики.

E-mail: litvinovii@mail.ru