



## PS1 – Poster-06



### Усовершенствование дифференциальной защиты трансформатора – опыт разработки и тестирования

Т. ЙИП, М. МОСКОСО, Г. ЛЛОЙД, К. ЛИУ, З. ВАН  
ALSTOM Grid  
Великобритания  
[tony.yip@alstom.com](mailto:tony.yip@alstom.com)

#### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Новые алгоритмы, дифференциальная защита трансформатора, насыщение ТТ, бросок тока намагничивания.

#### 1 ВВЕДЕНИЕ

Обычно в дифференциальной защите трансформатора применялась процентная тормозная характеристика. Традиционные схемы защиты, для обеспечения устойчивости к насыщению ТТ, используют характеристику с двумя и более наклонами, совместно с анализом тока второй гармоники для блокировки или торможения при бросках тока. Однако исследования показали, что есть ограничения по устойчивости характеристики с двумя наклонами, в частности повышение требований к параметрам ТТ. Также было показано, что блокировка по второй гармонике замедляет срабатывание защиты на внутренние повреждения при насыщении трансформаторов [1], [2]. Это связано с тем, что сигнал насыщенного ТТ может содержать высокую вторую гармоническую составляющую. Ранее исследования бросков тока намагничивания показали, что вторая гармоническая составляющая может составлять 15% и более от основной гармоники тока [3]. Последние исследования показывают, что усовершенствование конструкции трансформаторов и качества стали сердечника, позволили снизить содержание второй гармоники (до 7%) [3].

В этой статье представлены новые алгоритмы, созданные для усовершенствования выполнения дифференциальной защиты трансформатора с торможением. Был выполнен алгоритм торможения для переходных состояний, который моментально увеличивает порог срабатывания при внезапном увеличении тока торможения, тем самым повышается устойчивость к внешним повреждениям. Такой подход не затронет работу во время внутренних повреждений, так как дифференциальный ток увеличивается намного быстрее тока торможения. Разработан новый алгоритм обнаружения насыщения ТТ. Он основан на том, что форма сигналов броска тока намагничивания и тока насыщения искажены, в обоих случаях имеется нарушение сплошности. Новый способ выявляет нарушения сплошности, дифференцируя значение дифференциального тока, что позволяет отличать броски тока намагничивания от насыщения ТТ в течение цикла. Дополнительно для обнаружения насыщения ТТ применяется алгоритм обнаружения отсутствия провалов. Алгоритм контролирует число выборок, превышающих динамический порог за N последних вычислений. Выявление насыщения ТТ или обнаружение отсутствия провалов позволяет разблокировать дифференциальную защиту при блокировке по второй гармонике. В результате дифференциальный элемент с торможением производит отключение быстрее для внутренних повреждений даже при насыщении ТТ.

## 2 МЕТОД ТОРМОЖЕНИЯ ДЛЯ ПЕРЕХОДНЫХ СОСТОЯНИЙ

Для обеспечения устойчивости к внешним повреждениям учитываются дополнительные измерения в части вычисления токов торможения: ток торможения с задержкой, максимальный ток торможения и ток торможения для переходного состояния.

Ток торможения с задержкой вычисляется для каждой фазы как максимальное значение тока торможения за последний период. Ток торможения с задержкой обеспечивает дополнительную устойчивость, когда внешнее повреждение устраняется и токи повреждения исчезают.

$$I_{bias\_A\_delayed} = \text{Maximum} [I_{bias, A}(n), I_{bias, A}(n-1), \dots, I_{bias, A}(n - (k-1))] \quad \text{Уравнение 1}$$

$$I_{bias\_B\_delayed} = \text{Maximum} [I_{bias, B}(n), I_{bias, B}(n-1), \dots, I_{bias, B}(n - (k-1))] \quad \text{Уравнение 2}$$

$$I_{bias\_C\_delayed} = \text{Maximum} [I_{bias, C}(n), I_{bias, C}(n-1), \dots, I_{bias, C}(n - (k-1))] \quad \text{Уравнение 3}$$

Максимальный ток торможения выбирается как максимальный из токов торможения с задержкой для всех трех фаз. Максимальный ток торможения используется для предотвращения неправильного срабатывания при внешних повреждениях, когда разностный ток может протекать в неповрежденной фазе, ТТ которой частично насыщен.

$$I_{bias, max} = \text{Maximum} [I_{biasA\_delayed}, I_{biasB\_delayed}, I_{biasC\_delayed}] \quad \text{Уравнение 4}$$

Максимальный ток торможения используется для расчета дифференциального рабочего тока  $I_{op}$ , используя следующие уравнения, в соответствии с характеристикой на рисунке 1:

$$\text{Уравнение характеристики для диапазона: } 0 \leq I_{bias, max} \leq \frac{I_{s1}}{K_1} \quad \text{Уравнение 5}$$

$$I_{op} = I_{s1} \quad \text{Уравнение 6}$$

$$\text{Уравнение характеристики для диапазона: } \frac{I_{s1}}{K_1} \leq I_{bias, max} \leq I_{s2} \quad \text{Уравнение 7}$$

$$I_{op} = K_1 \cdot I_{bias, max} \quad \text{Уравнение 8}$$

$$\text{Уравнение характеристики для диапазона: } I_{bias} \geq I_{s2} \quad \text{Уравнение 9}$$

$$I_{op} = K_1 \cdot I_{s2} + K_2 (I_{bias, max} - I_{s2}) \quad \text{Уравнение 10}$$

$$K_1: \quad \text{наклон характеристики в диапазоне } \frac{I_{s1}}{K_1} \leq I_{bias, max} \leq I_{s2} \quad \text{Уравнение 11}$$

$$K_2: \quad \text{наклон характеристики в диапазоне } I_{bias, max} \geq I_{s2} \quad \text{Уравнение 12}$$

Тормозной ток для переходных состояний вводится при внезапном возрастании значений токов торможения. Тормозной ток для переходных состояний снижается по экспоненте и сбрасывается до нуля после отключения, или если его значение опускается ниже уставки ограничивающего элемента. Рассчитывается рабочий ток при максимальном токе торможения. Тормозной ток для переходного состояния вычисляется для каждой фазы и прибавляется к рабочему току при максимальном токе торможения. Следовательно, имеем выражения для порогов дифференциального тока срабатывания:

$$\text{Diff threshold phase A} = I_{op} \text{ at max bias} + \text{transient bias\_phase A} \quad \text{Уравнение 13}$$

$$\text{Diff threshold phase B} = I_{op} \text{ at max bias} + \text{transient bias\_phase B} \quad \text{Уравнение 14}$$

$$\text{Diff threshold phase C} = I_{op} \text{ at max bias} + \text{transient bias\_phase C} \quad \text{Уравнение 15}$$

Дифференциальный ток сравнивается с пороговым значением для каждой фазы, уравнения 13-14. Если дифференциальный ток превысит пороговое значение, то функция дифференциальной защиты срабатывает, при условии отсутствия блокировки по второй или пятой гармонике.

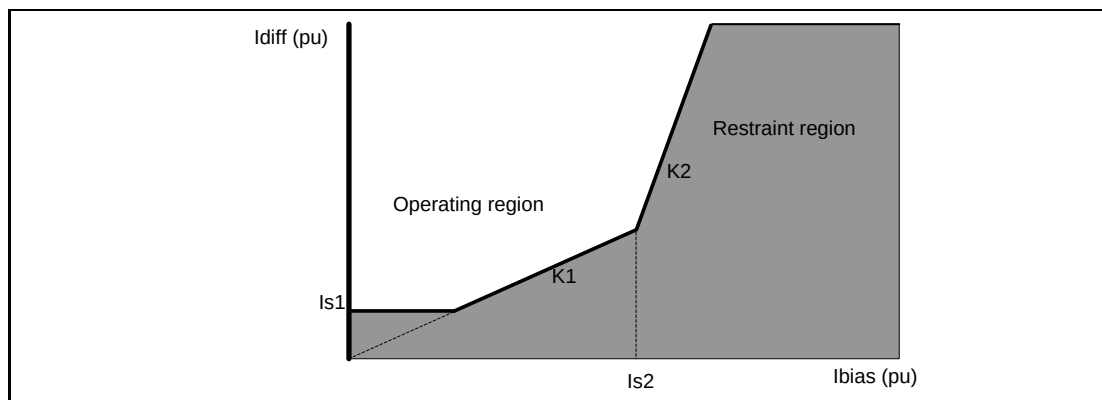


Рис. 1: Характеристика срабатывания дифференциальной защиты

Метод торможения для переходных состояний учитывает постоянную времени затухания, коэффициенты устойчивости и уставки дифференциальной защиты для обеспечения динамической тормозной характеристики. На рисунке 2 показаны пороги дифференциального тока, рассчитанные реле для каждой фазы, для случая замыкания АН на стороне звезды трансформатора YNd11. Можно заметить, что при таком подходе устойчивость реле повышается. Для срабатывания реле дифференциальный ток должен превысить значение рабочего тока при максимальном токе торможения + ток торможения для переходного состояния.

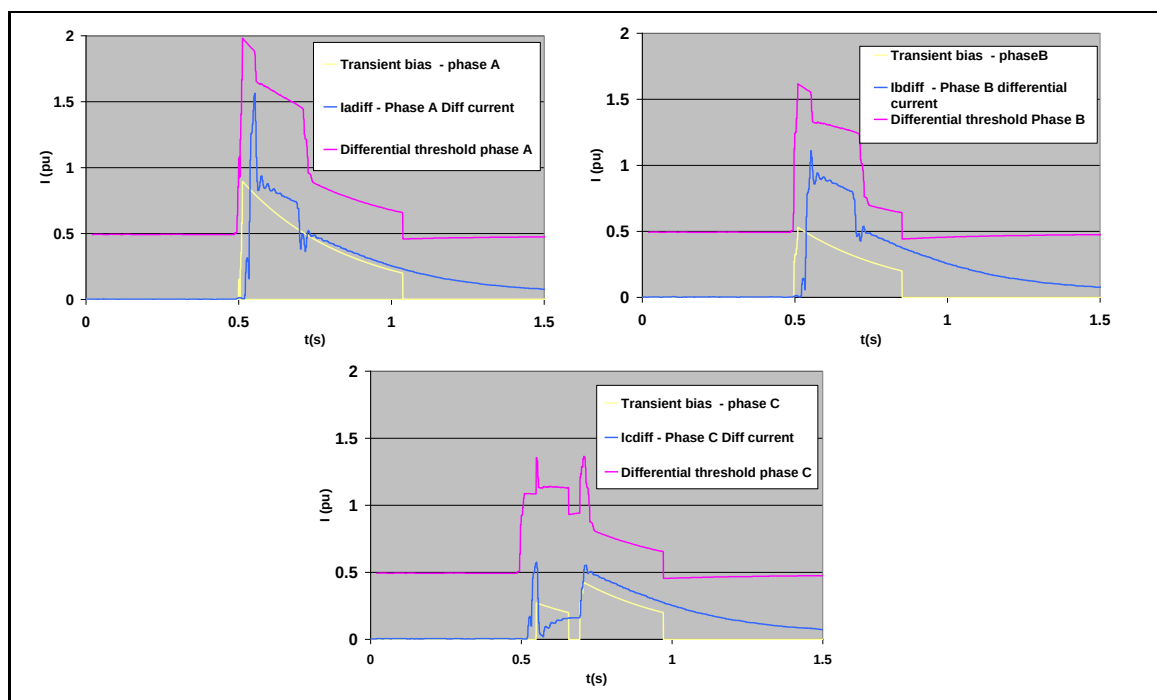


Рис. 2: Торможение – внешнее повреждение

На рисунке 3 показаны номинальная тормозная характеристика, динамический порог и дифференциальный ток фазы. Дифференциальные токи возрастают от А до В, между тем также увеличиваются пороги дифференциального тока от А' до В'.

Можно заметить, что в случае с номинальной характеристикой для фаз А и В произойдет неправильное отключение, так как дифференциальные токи  $I_{a_{diff}}$  и  $I_{b_{diff}}$  выше номинальной характеристики. Принимая во внимание значения токов торможения для переходного состояния, предотвращаем нежелательное срабатывание, так как токи  $I_{a_{diff}}$  и  $I_{b_{diff}}$  ниже динамического порога срабатывания, участок В С (В' С') на рисунке 3.

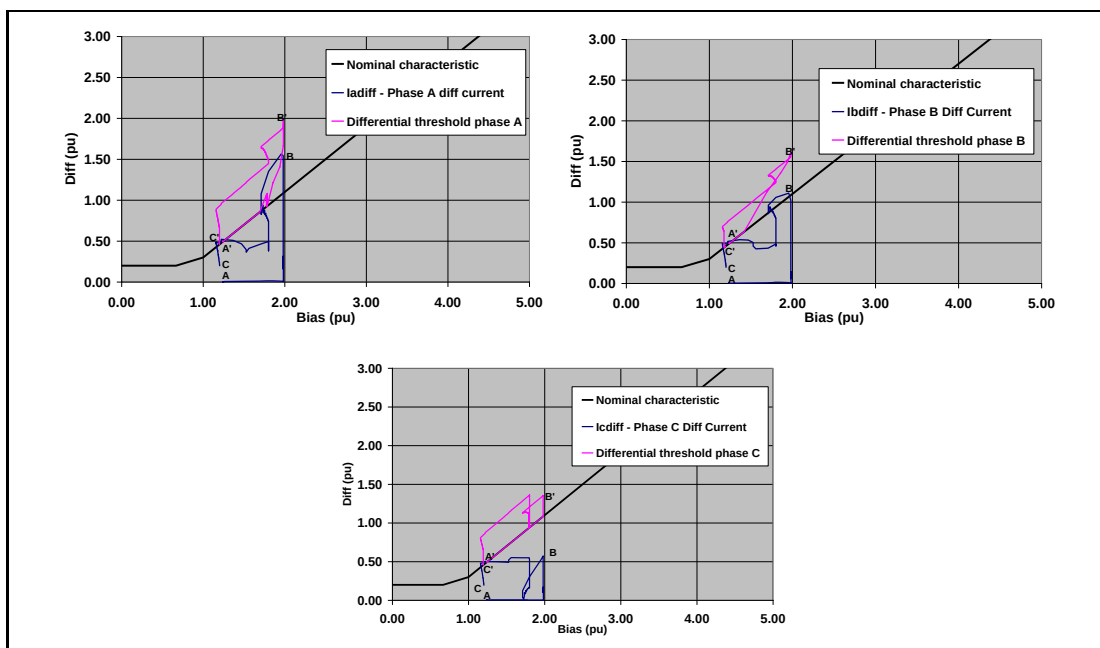


Рис. 3: Дифференциальная характеристика с торможением для переходного состояния – внешнее повреждение

Торможение в переходном состоянии повышает устойчивость дифференциальной функции к внешним повреждениям и учитывает задержку в насыщении ТТ, вызванного небольшими токами внешних повреждений и высоким соотношением X/R. Для внутренних повреждений с односторонней или двусторонней подпиткой дифференциальный ток доминирует, и торможение для переходного состояния не препятствует срабатыванию.

На рисунке 4 показаны дифференциальные пороги, рассчитанные для каждой фазы при внутреннем повреждении BN на стороне треугольника трансформатора YNd11. Торможение для переходного состояния не предотвращает срабатывание дифференциальной функции, так как дифференциальный ток превышает динамический порог срабатывания.

На рисунке 5 показано, что динамический порог и номинальная характеристика совпадают, так как тормозной ток для переходного состояния равен нулю для фазы А. Для фаз В и С порог срабатывания увеличивается за счет торможения в переходном состоянии, но так как это внутреннее повреждение, дифференциальный ток расположен выше динамического порога.

Торможение для переходных состояний не вводится при переключении режима нагрузки, если ТТ выходит из состояния насыщения.

### 3 НАСЫЩЕНИЕ ТТ И МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ОТСУТСТВИЯ ПРОВАЛОВ

Когда для стабилизации дифференциальной функции во время бросков тока применяется блокировка по второй гармонике, алгоритм обнаружения насыщения ТТ может использоваться для улучшения времени срабатывания при внутреннем повреждении с насыщением ТТ. Содержание второй гармоники может превышать порог блокировки при внутренних повреждениях, сопровождающихся насыщением ТТ. В результате, дифференциальная функция может быть заблокирована при внутреннем повреждении. Если ток повреждения недостаточно высок, то порог дифференциальной отсечки не будет превышен, и не будет достигнуто быстрое отключение. Функция дифференциальной защиты с торможением срабатывает, когда ТТ выйдет из насыщения. В результате имеем срабатывание дифференциальной защиты с задержкой [1],

[2]. Задержки при срабатывании можно избежать, используя деблокировку дифференциальной функции при определении внутреннего повреждения, или при применении ТТ с достаточно высокой точкой загиба на характеристике намагничивания, для избежания насыщения (что может быть невыполнимо).

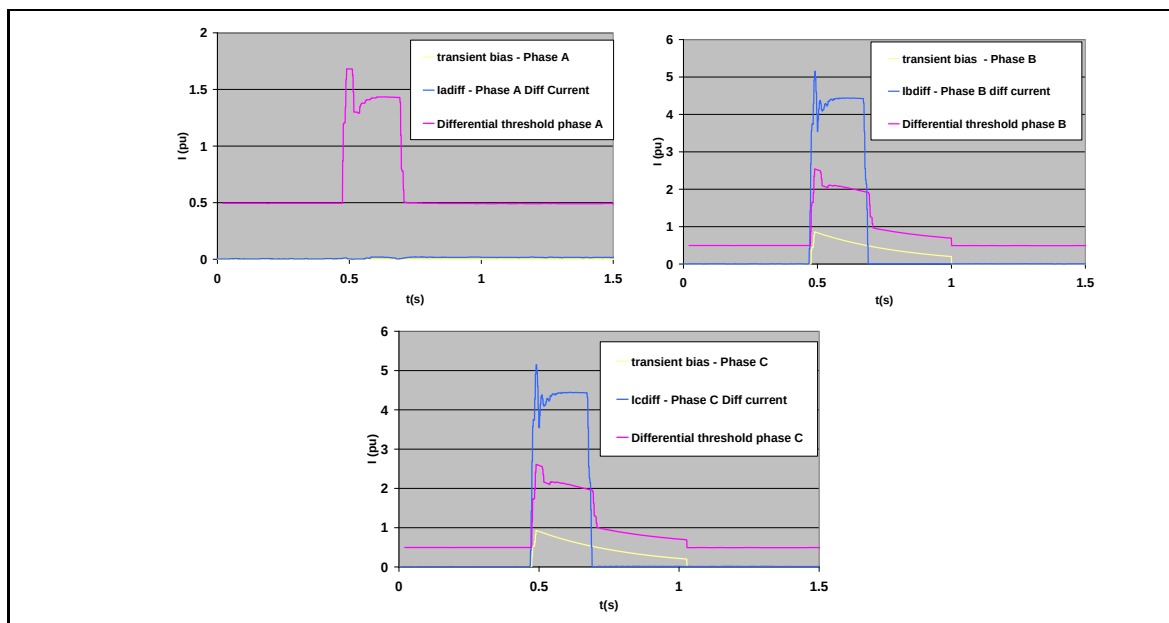


Рис. 4: Торможение для переходного состояния – внутреннее повреждение

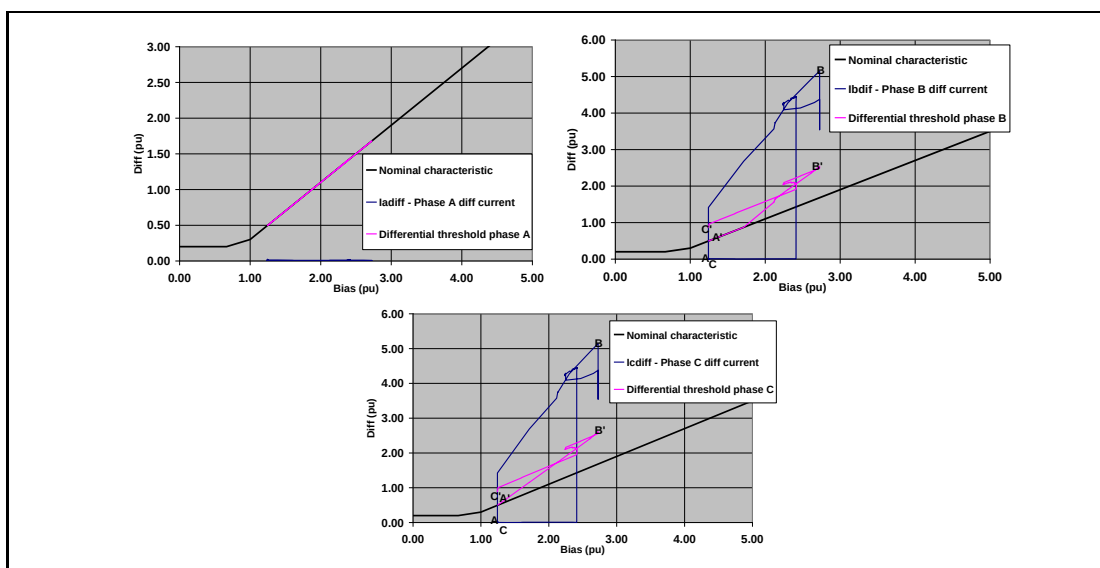


Рис. 5: Торможение для переходного состояния – дифференциальная характеристика – внутреннее повреждение

Метод обнаружения насыщения ТТ различает состояние насыщения и броски тока намагничивания, что позволяет сохранять устойчивость реле. Для обнаружения насыщения ТТ для каждой фазы контролируются выборки дифференциального тока. Реле анализирует форму сигнала дифференциального тока, рассматривая его производные, динамику, и фиксированные пороги, полученные при моделировании комплексом RTDS. Логика обнаружения насыщения ТТ деблокирует дифференциальную функцию с торможением, разрешая отключение при насыщении ТТ.

Метод обнаружения отсутствия провалов дополняет логику обнаружения насыщения ТТ. Для каждой фазы подсчитывается число выборок превышающих динамический порог для последних  $N$  вычислений. Этот порог - функция содержания второй гармоники. Если

суммарное число выборок больше динамического порога выше или равно фиксированному значению, определенному тестами RTDS, тогда нет разрыва, и дифференциальная функция не будет заблокирована.

Методы обнаружения насыщения ТТ и отсутствия провалов влияют на срабатывание дифференциальной функции с торможением. Если определена блокировка по второй гармонике, и при этом обнаружено насыщение ТТ, либо отсутствие провалов, то дифференциальная функция будет разблокирована. Отключение произойдет, если нет блокировки по пятой гармонике и срабатывает дифференциальная функция с торможением. Логика дифференциальной функции с торможением показана на рисунке 6.

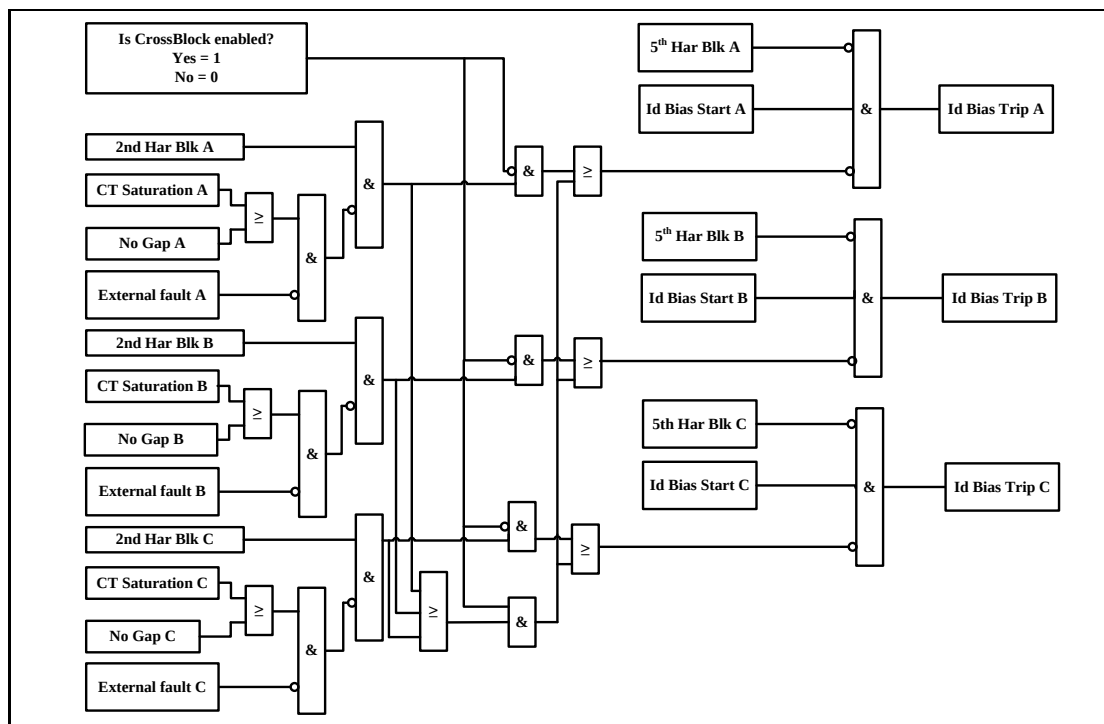


Рис. 6: Логика отключения от дифференциальной защиты с торможением

Было проведено обширное моделирование в реальном времени для оценки этих методов. На рисунке 7(а) показана запись внутреннего повреждения АН, иллюстрирующая работу при включенных алгоритмах обнаружения насыщения ТТ и отсутствия провалов, время срабатывания 28мс. Можно видеть, что обе логики сработали и дополняют друг друга. На рисунке 7(б) показана запись того же повреждения при выведенных алгоритмах обнаружения насыщения ТТ и отсутствия провалов, время срабатывания составило 57 мс. Отсюда, реле срабатывает на 29 мс быстрее, если введены логики обнаружения насыщения ТТ и отсутствия провалов.

#### 4 ТРЕБОВАНИЯ К ТТ

С целью определения требований к ТТ для дифференциальной функции были проведены тесты при разных отношениях X/R, нагрузке ТТ, при разных токах повреждений, типах повреждений и для разных точек на кривой повреждения. Рассматриваются формы сигналов токов повреждения для шести режимов повреждения, где три последних режима заданы так, чтобы генерировать в ТТ поток, противоположный по направлению потоку от первых трех режимов.

Для обоснования требований к ТТ инкрементировалась нагрузка и повторялись шесть режимов повреждения, пока не был достигнут предел нагрузки, либо до ошибочного срабатывания реле.

На рисунке 8 показаны требования к ТТ для случаев, когда применяется и не применяется торможение для переходного состояния. Можно заметить, что когда торможение

для переходного сопротивления не применяется, К фактор в 5 раз выше, чем в случае, когда применяется.

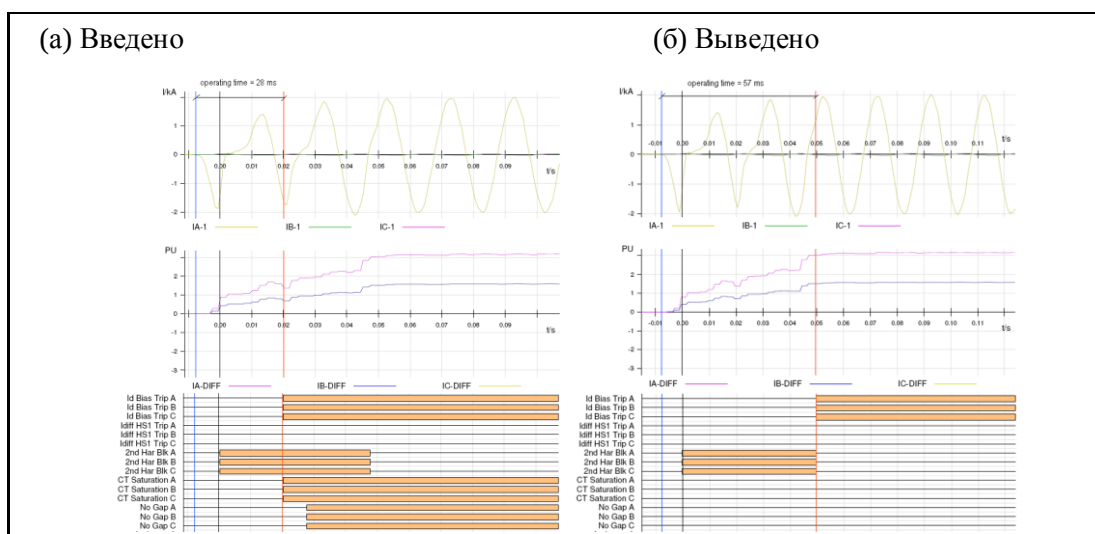


Рис. 7: (а) Логика обнаружения насыщения ТТ и отсутствия провалов введены, (б) логики обнаружения насыщения ТТ и отсутствия провалов выведены

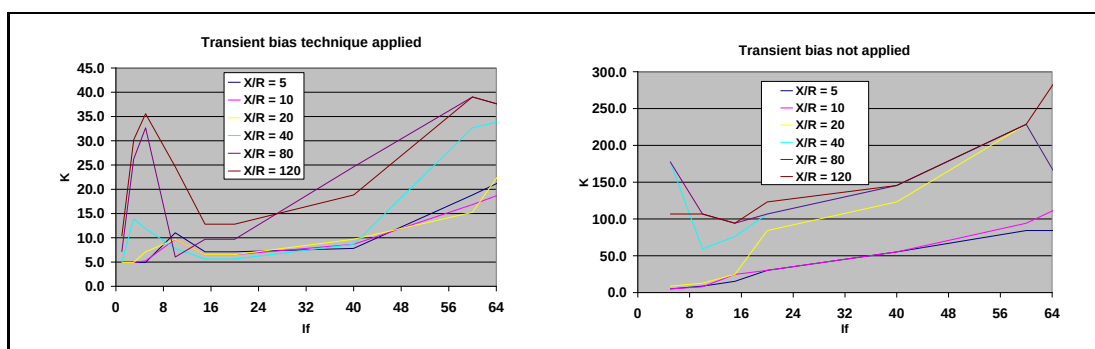


Рис. 8: Требования к ТТ с торможением для переходных состояний и без

Рассматривая результаты, показанные на рисунке 8 для случая с торможением в переходном состоянии можно сделать заключение:

| Параметры системы                              | К<br>(коэф. характеризующий намагничивание ТТ) | Напряжение точки излома                                                                                                   |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $I_n < I_F \leq 64I_n$<br>$5 \leq X/R \leq 20$ | $K = 25$                                       | $V_K \geq 25 \times I_n \times (R_{CT} + 2R_L + R_r)^{(1)}$<br>$V_K \geq 25 \times I_n \times (R_{CT} + R_L + R_r)^{(2)}$ |
| $I_n < I_F \leq 64I_n$<br>$20 < X/R \leq 120$  | $K = 40$                                       | $V_K \geq 40 \times I_n \times (R_{CT} + 2R_L + R_r)^{(1)}$<br>$V_K \geq 40 \times I_n \times (R_{CT} + R_L + R_r)^{(2)}$ |

Табл. 1: Требования ТТ

Где:

К = CT dimensioning factor

$I_F$  = максимальный ток внешнего повреждения

X/R = отношение X/R первичной системы

$I_n$  = номинальный ток реле

$R_r$  = сопротивление других реле защиты, использующих ТТ ( $\Omega$ )

(1) = однофазное или двухфазное замыкание на землю

(2) = трехфазное или междуфазное замыкание

Чтобы гарантировать, что достигнута устойчивость к сквозным повреждениям, следующие отношения:

$$V_{k-HV} / R_{tot-HV} : V_{k-LV} / R_{tot-LV}$$

$$V_{k-HV} / R_{tot-HV} : V_{k-TV} / R_{tot-TV}$$

$$V_{k-LV} / R_{tot-LV} : V_{k-TV} / R_{tot-TV}$$

не должны превысить максимальное отношение 4:1. Выполнение соотношений гарантирует, что во время сквозных повреждений плотность потока в трансформаторах тока не отличается значительно [5].

Где:

$V_{k-HV}$  = Напряжение точки излома ТТ на стороне ВН

$R_{tot-HV}$  = Совокупная нагрузка на ТТ стороны ВН = ( $R_{CT} + 2R_l + R_r$ ) or ( $R_{CT} + R_l + R_r$ )

$V_{k-LV}$  = Напряжение точки излома ТТ на стороне НН

$R_{tot-LV}$  = Совокупная нагрузка на ТТ стороны НН = ( $R_{CT} + 2R_l + R_r$ ) or ( $R_{CT} + R_l + R_r$ )

$V_{k-TV}$  = Напряжение точки излома ТТ на стороне СН

$R_{tot-TV}$  = Совокупная нагрузка на ТТ стороны СН = ( $R_{CT} + 2R_l + R_r$ ) or ( $R_{CT} + R_l + R_r$ )

## 5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрировано, что алгоритм торможения для переходного состояния улучшает устойчивость дифференциальной функции с торможением, так как тормозная характеристика динамически учитывает увеличение тока торможения и уставки дифференциальной защиты. Кроме того, требования ТТ для дифференциальной защиты с торможением намного ниже, при использовании метода торможения для переходного состояния.

Методы обнаружения насыщенности ТТ и отсутствия провалов уменьшают время срабатывания, поскольку дифференциальная функция не блокируется во время внутренних повреждений, сопровождающихся насыщением ТТ. Кроме того, при использовании этих методов снижаются требования к ТТ.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] IEEE Std C37.91-2000 Guide for Protective Relay Application to Power Transformers.
- [2] ALSTOM Transformer Differential Protection Relay MBCH publication R6070L.
- [3] BLACKBURN J. L., 1997. Protective Relaying Principles and Applications. 2nd ed. New York: New York.
- [4] NGTS 3.24.18 Issue 1 – 2000 Unit Feeder Main Protection.
- [5] ALSTOM KBCH Manual KBCH/EN-M-G11.