

КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ

Кужеков С. Л., Сербиновский Б. Б.

Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)
eps@eps.srstu.novoch.ru

Предложены алгоритмы компенсации погрешностей трансформаторов тока в переходных режимах короткого замыкания без использования характеристики намагничивания. Алгоритмы основаны на отыскании участков достаточно точной трансформации первичного тока и восстановлении по ним первичного тока, содержащего периодическую и аperiodическую составляющие.

Трансформаторы тока (ТТ), используемые в быстродействующих схемах дифференциальной защиты (ДЗ) электродвигателей (ЭД), должны иметь полную погрешность не более 10% в переходных и установившихся режимах работы защищаемых объектов, включая короткие замыкания. Однако в реальных условиях полная погрешность может существенно превышать 10%, например, в переходных режимах при появлении аperiodических составляющих погрешность достигает 80% [1]. Под полной погрешностью ТТ понимают величину:

$$\epsilon = \frac{1}{100} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_1' - i_2)^2 dt},$$

где T – период измерения тока;

i_1' – первичный ток ТТ, приведенный к вторичной цепи;

i_2 – вторичный ток ТТ.

Погрешности ТТ оказывают влияние на работу устройств ДЗ ЭД и могут снижать их быстродействие, а также приводить к их неправильному функционированию. Особенно велики погрешности ТТ в переходных режимах, когда в первичном токе содержится аperiodическая составляющая, постоянная времени затухания которой составляет в среднем 0,05 с. Для мощных ЭД постоянная времени затухания может достигать 0,1 с. В этих условиях время существования повышенных погрешностей переходного режима равно 0,15–0,3 с, что намного превышает время срабатывания устройств ДЗ [2].

Для обеспечения правильной работы устройств ДЗ традиционно применяют:

- закругление уставок срабатывания;
- отстройку от аperiodической составляющей;
- торможение высшими гармоническими составляющими;
- процентное торможение;
- сравнение токов по фазе и др.

Однако все эти способы не исключают причины неправильного функционирования устройств ДЗ – ухудшения трансформации ТТ при высоких кратностях первичного тока, усугубляющейся влиянием аperiodической составляющей [1]. Поэтому в ходе разработки современных устройств релейной защиты (РЗ) и диагностики ЭД требуется применение более совершенных методов оценки работы ТТ и поведения устройств РЗ в целом.

Известные алгоритмы отстройки РЗ от аperiodической составляющей и насыщения ТТ можно подразделить на алгоритмы с использованием и без использования характеристики намагничивания ТТ [3]. Применение алгоритмов второй группы при проектировании устройств РЗ представляется более целесообразным, поскольку данные методы компенсации погрешностей ТТ базируются на использовании информации только о вторичном токе ТТ, следовательно, являются более универсальными [3].

Известно, что при глубоком насыщении сердечника ТТ в каждом полупериоде существует интервал времени, на протяжении которого рабочая точка вебер-амперной характеристики перемещается по линейному участку. На этом участке полная погрешность ТТ для мгновенных значений не превосходит 10% [4]. В алгоритмах второй группы (без использования характеристики намагничивания ТТ) определяют участки достаточно точной трансформации ТТ и восстанавливают по ним первичный ток [3]. Здесь под достаточно точной трансформацией понимается работа ТТ с полной погрешностью, не превышающей 10%.

В [3] проведен анализ возможностей алгоритмов, использующих для определения участков достаточно точной трансформации первичного тока ТТ мгновенные значения вторичного тока ТТ, а также мгновенные значения и первую производную вторичного тока ТТ, дана оценка слабых и сильных сторон проанализирован-

ных алгоритмов. В результате анализа алгоритмов отстройки РЗ от апериодической составляющей и от насыщения ТТ в [3] сформированы требования, которым должен удовлетворять алгоритм выделения основной гармоники сигнала ТТ в режиме насыщения.

1. Алгоритм должен работать в установившихся и в переходных режимах работы защищаемого объекта.

2. Алгоритм должен осуществлять компенсацию погрешности, обусловленной насыщением ТТ без использования характеристики намагничивания.

3. Результатом работы алгоритма должны быть значения амплитуды и фазы первой гармоники первичного тока, приведенного к вторичной цепи, для каждого полупериода, либо восстановленная последовательность дискретных значений указанного тока.

При разработке алгоритма компенсации погрешностей ТТ в переходных режимах короткого замыкания использовались следующие допущения [3]:

- ток, протекающий в первичной обмотке ТТ, является суммой периодической и апериодической составляющих;
- амплитуда и частота периодической составляющей неизменны в течение одного полупериода;
- значение апериодической составляющей неизменно на некотором конечном участке и меняется скачкообразно.

На основании принятых допущений и требований, предъявляемых к алгоритму отстройки РЗ от апериодической составляющей и от насыщения ТТ, в [3] были разработаны два альтернативных алгоритма компенсации погрешностей ТТ в переходных режимах короткого замыкания без использования характеристики намагничивания.

Первый алгоритм определения участков достаточно точной трансформации первичного тока и восстановления по ним первой гармоники сигнала ТТ использует мгновенные значения и первую производную вторичного тока ТТ. Расчетные формулы восстановления первой гармоники сигнала ТТ в режиме насыщения для первого алгоритма были получены в результате математических преобразований выражений, описывающих:

- вторичный ток ТТ на некотором конечном временном интервале T , согласно допущениям, принятым при разработке алгоритма:

$$i_2 = I_m \sin(\omega_H t + \varphi_0) + I_0,$$

где I_m – амплитуда первой гармоники первичного тока ТТ, приведенного к вторичной цепи;

ω_H – номинальная частота первой гармоники первичного тока ТТ, приведенного к вторичной цепи;

φ_0 – начальная фаза первой гармоники первичного тока ТТ, приведенного к вторичной цепи;

I_0 – значение апериодической составляющей первичного тока ТТ, приведенного к вторичной цепи;

- первую производную вторичного тока ТТ:

$$\frac{di_2}{dt} = i'_2 = I_m \omega_H \cos(\omega_H t + \varphi_0).$$

В результате соответствующих математических преобразований выражений, описывающих вторичный ток ТТ и его первую производную для мгновенных значений, были получены выражения для расчета амплитуды I_{mj} , фазы φ_j , круговой частоты ω_j периодической составляющей и апериодической составляющей I_{0j} первичного тока ТТ, приведенного к вторичной цепи, для момента времени j как функции вида:

$$I_{mj} = f(i_{2j}, i'_{2j}),$$

$$\varphi_j = f(i_{2j}, i'_{2j}),$$

$$\omega_j = f(i_{2j}, i'_{2j}),$$

$$I_{0j} = f(i_{2j}, i'_{2j}).$$

Значения первой производной вторичного тока ТТ, могут быть получены различными численными методами, например, при исследовании алгоритма в [3] значения первой производной рассчитывались по формуле:

$$i'_{2j} = f_{ADC} \frac{-2i_{2j-2} - i_{2j-1} + i_{2j+1} + 2i_{2j+2}}{10},$$

где f_{ADC} – частота дискретизации вторичного тока ТТ.

Второй алгоритм использует только мгновенные значения вторичного тока ТТ. В результате соответствующих математических преобразований выражений, описывающих вторичный ток ТТ, были получены выражения для расчета амплитуды I_{mj} , фазы φ_j , круговой частоты ω_j периодической составляющей и апериодической составляющей I_{0j} первичного тока ТТ, приведенного к вторичной цепи, для момента времени j как функции вида:

$$I_{mj} = f(i_{2j}, \Delta\varphi),$$

$$\varphi_j = f(i_{2j}, \Delta\varphi),$$

$$\omega_j = f(i_{2j}, \Delta\varphi),$$

$$I_{0j} = f(i_{2j}, \Delta\varphi),$$

где $\Delta\varphi$ - приращение фазы первой гармоники первичного тока ТТ, приведенного к вторичной цепи, за время между j -тым и $(j-1)$ -вым мгновенным значением вторичного тока ТТ, может быть рассчитано по формуле:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi f}{f_{\text{ADC}}} = \frac{\omega_H}{f_{\text{ADC}}}.$$

Для выделения участков достаточно точной трансформации ТТ был разработан частотно-амплитудный критерий [3], позволяющий осуществлять поиск участков достаточно точной трансформации ТТ в два этапа:

1. На первом этапе с помощью частотного критерия осуществляется первичный поиск участков достаточно точной трансформации по отклонению значения круговой частоты ω_j от заданного номинального значения ω_H на некотором временном интервале.

При определении участков достаточно точной трансформации первичного тока ТТ по частотному критерию также учитывается ограничение по ширине интервала: на предполагаемом интервале достаточно точной трансформации первичного тока ТТ должно находиться не менее двух рассчитанных значений амплитуды и фазы, удовлетворяющих частотному критерию.

2. На втором этапе используется амплитудный критерий, позволяющий осуществлять уточненный поиск участков достаточно точной трансформации ТТ на интервалах, удовлетворяющих частотному критерию, по отклонению значения амплитуды I_{mj} от среднего значения $I_{\text{ср}}$, вычисляемого для каждого участка, удовлетворяющего частотному критерию.

В [3] было проведено исследование разработанных алгоритмов на сигналах, аппроксимирующих вторичный ток ТТ, для трех режимов работы, в том числе:

- переходный режим без насыщения;
- установившийся режим с насыщением;
- переходный режим с насыщением.

На рис. 1 приведены результаты расчета алгоритма (использующего для восстановления первой гармоники сигнала ТТ мгновенные значения вторичного тока ТТ) круговой частоты периодической составляющей ω_j , амплитуды периодической составляющей I_{mj} , аperiodической составляющей I_{0j} при работе ТТ в переходном режиме с насыщением. Результат работы алгоритма представляет собой восстановленную последовательность дискретных значений периодической составляющей первичного тока ТТ, приведенного к вторичной цепи (рис. 2). Также на рис. 2 для сравнения приведены последовательности дискретных значений вторичного тока ТТ и периодической составляющей, содержащейся в первичном токе ТТ, приведенном к вторичной цепи.

Предложенные алгоритмы компенсации погрешностей ТТ в переходных режимах короткого замыкания могут быть реализованы в устройствах РЗ и автоматики предназначенных, например, для:

- ДЗ ответственных ЭД, трансформаторов, генераторов и линий электропередачи;
- ДЗ сборных шин и ошинок;
- определения места повреждения на ЛЭП и др.

ВЫВОДЫ

1. Разработанные алгоритмы позволяют решать задачу восстановления первой гармоники сигнала ТТ в переходных и установившихся режимах работы.

2. Разработанные алгоритмы компенсации погрешностей ТТ в переходных режимах короткого замыкания не требуют использования характеристики намагничивания.

3. Частотно-амплитудный критерий позволяет определять участки достаточно точной трансформации первичного тока ТТ.

4. Разработанные алгоритмы компенсации погрешностей ТТ в переходных режимах короткого замыкания позволяют вычислять частоту, фазу, амплитуду периодической составляющей и значение аperiodической составляющей.

5. Погрешность определения амплитуды периодической составляющей при максимальном значении аperiodической составляющей для алгоритма, использующего мгновенные значения и первую производную вторичного тока ТТ, равна 17,5%; для алгоритма, использующего мгновенные значения вторичного тока ТТ, равна 10,5%.

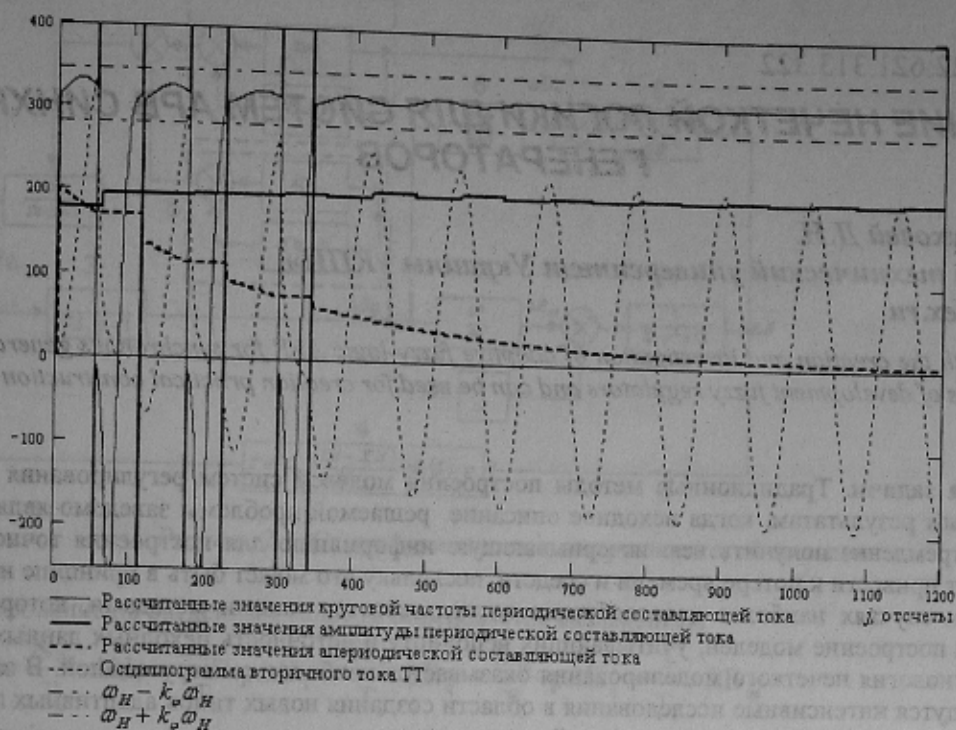


Рис. 1. Круговая частота, амплитуда периодической составляющей и аperiodическая составляющая

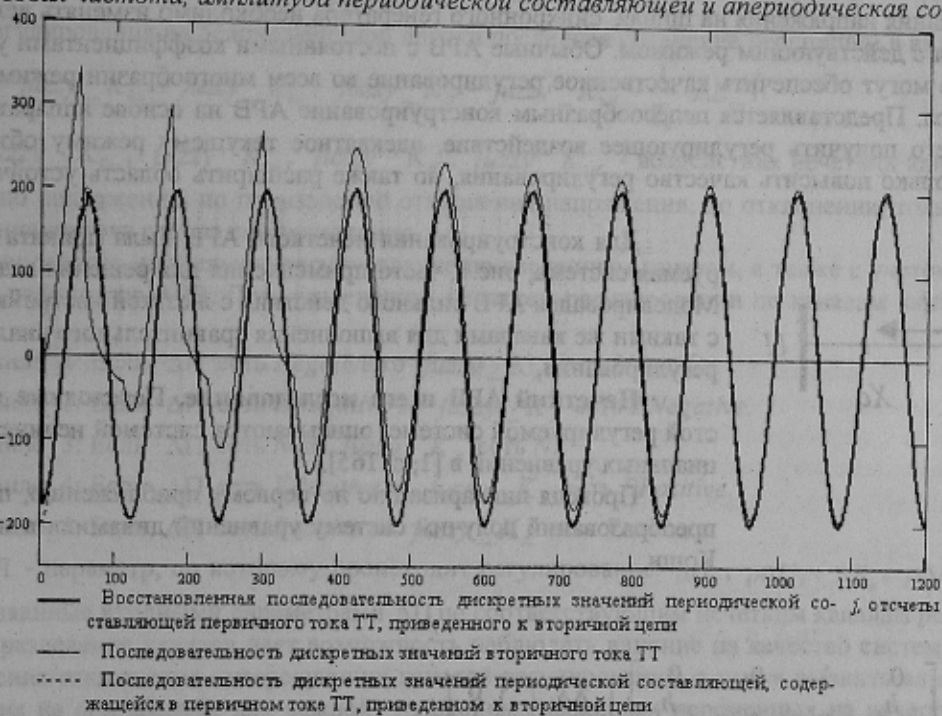


Рис. 2. Восстановленная последовательность дискретных значений периодической составляющей первичного тока ТТ, приведенного к вторичной цепи

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Кужиков С.Л., Сербиновский Б.Б. Компенсация погрешностей трансформаторов тока в переходных режимах короткого замыкания // Изв. вузов. Электромеханика, 2003. - Кибернетика электрических систем [Прил. к жур.]. - с. 55-56.
- 2 Корогодский В.И. и др. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ // В.И. Корогодский, С.Л. Кужиков, Л.Б. Паперно. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 248 с.
- 3 Кужиков С.Л., Сербиновский Б.Б. Выделение основной гармоники сигнала трансформатора тока в режиме насыщения: Препринт. - СПб.: ОЭЭП РАН, 2003. - 39с.
- 4 Кужиков С.Л., Сидельников В.Я. Защита шин электростанций и подстанций. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 184 с.