

УДК 621.3

КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА В РЕЖИМЕ НАСЫЩЕНИЯ

И. Н. Одинаев¹, А. В. Паздерин², П. В. Мурзин³, Н. А. Морозенко⁴

^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ i.n.odinaev91@mail.ru

Аннотация. В настоящей работе предложен метод компенсации погрешности трансформаторов тока (ТТ) в режиме, когда их магнитопровод насыщен. Показан поиск неизвестных параметров синусоидального сигнала. Также показана степень надежности метода относительно шума и количества измерений N .

Ключевые слова: трансформаторы тока (ТТ), компенсация погрешности, релейная защита, магнитопровод ТТ

CURRENT TRANSFORMER ERROR COMPENSATION UNDER SATURATION CONDITION

I. N. Odinaev¹, A. V. Pazderin², P. V. Murzin³, N. A. Morozenko⁴

^{1,2,3,4} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ i.n.odinaev91@mail.ru

Abstract. The paper presents a method to compensate the error of current transformer under saturation condition. Based on least square method the factor decision process is shown. The method reliability against noises in measured signal is shown as well.

Keywords: Current transformers (CTs), error compensation, protection system, CT core

В настоящее время для обеспечения систем релейной защиты и автоматизации измерительной информацией в энергетических систе-

мах применяются электромагнитные трансформаторы тока (ТТ) класса точности Р, магнитопровод которых выполнен в виде замкнутого сердечника. Из-за отсутствия воздушного зазора остаточная намагниченность может достигать 80 % [1] от предельно допустимой и в зависимости от уровня первичного тока может сохраняться более 8 ч [2]. В соответствии с IEC 600–44–1 полная погрешность указанных ТТ не должна превышать 10 % в установившемся режиме. Однако из-за отсутствия требований к остаточной намагниченности магнитопроводов ТТ класса Р как в переходных, так и в установившихся режимах сети может возникать насыщение. Так, существует анализ неселективной работы дифференциальной защиты шин, вызванной насыщением ТТ [3].

Кроме того, предложен метод компенсации погрешности ТТ в режиме насыщения магнитопровода, который, однако, имеет высокую чувствительность относительно начальной магнитной индукции [4]. В целях избегания этого недостатка предлагается использовать модификацию такого метода с помощью прогнозирования [5; 6].

Основным недостатком этих подходов является зависимость от точности получения первого прогнозного отчета. Апробация таких методов показала, что при наличии шума в измеренных отчетах вторичного тока прогнозное значение сильно искажается, что негативно влияет на эффект компенсации [7].

В рамках настоящей работы предложен метод снижения погрешности ТТ при насыщении магнитопровода, вызванного периодической составляющей первичного тока.

Сущность предложенного метода заключается в линейной аппроксимации участка синусоидального сигнала, что позволяет получить амплитуду A и начальную фазу φ_0 :

$$i = A \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (1)$$

В точки пересечения оси времени, используя следующую модель, можно найти A и φ_0 :

$$i_{\text{расчет}} = kt + b. \quad (2)$$

В предложенной модели неизвестными являются коэффициенты k и b , которые находятся с помощью метода наименьших квадратов (МНК) и измеренных отчетов модели (1). При определении коэффициентов необходимо, чтобы исходные данные для МНК были выбраны симметрично относительно нуля, чтобы первая часть измеренных

отсчетов находилась в положительной области модели (1), а вторая — в отрицательной.

Таким образом, зная k и b , (3) и (4), можно найти A и φ_0 :

$$A = \frac{k}{\omega}; \quad (3)$$

$$\varphi_0 = \frac{-kt_0}{A}, \quad (4)$$

где t_0 — момент времени, соответствующий $i = 0$.

Для проверки надежности метода относительно зашумленного сигнала был добавлен шум:

$$i = A \sin(\omega t + \varphi_0) \cdot (1 + \delta \vartheta), \quad (5)$$

где δ — априорно заданное значение уровня зашумления эталонного тока на основе оценки зашумленности в цепях измерений; ϑ — случайное число в диапазоне от -1 до $+1$, ϑ имеет нормальное (равномерное) распределение.

Результат работы метода при $\delta = 3\%$ приведен в таблице. При определении коэффициентов (2) производилась вариация количество измеренных отсчетов от $N = 3$ до $N = 10$. Амплитуда и начальная фаза модели (1) для упрощения анализа результатов расчета были приняты $A = 1$ и $\varphi_0 = -90^\circ$.

Таблица

Результаты расчета при $\delta = 3\%$

| N | $A_{\text{эталон}}$ | $A_{\text{расчет}}$ | $\varphi_{\text{эталон}}$ | $\varphi_{\text{расчет}}$ |
|-------|---------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------|
| 20–22 | 1 | 1,0039 | –90 | –90,309 |
| 19–23 | 1 | 0,9803 | –90 | –88,184 |
| 18–24 | 1 | 0,9991 | –90 | –89,877 |
| 17–25 | 1 | 0,9905 | –90 | –89,107 |
| 16–26 | 1 | 0,9866 | –90 | –88,746 |

Для наглядности работы метода на рис. 1 представлены кривые эталонного, измеренного и восстановленного токов при количестве измерений $N = 5$. Уровень шума задавался $\delta = 10\%$. Согласно рисунку, возникновение насыщения магнитопровода ТТ происходит в 50% от амплитуды эталонного тока.

В рамках настоящего исследования предложен новый метод компенсации погрешности ТТ в режиме насыщения. Результаты вычислительных экспериментов показывают, что метод относительно за-

шумленности измеренного сигнала является робастным и достаточно точно определяет параметры синусоидального сигнала, с учетом указанных ранее допущений. Так, например, при возникновении насыщения на уровне 50 % от амплитудного значения и наличия шума, равного $\delta = 10\%$, относительные погрешности A и φ_0 составляют 0,51 и 0,56 % соответственно (рис. 1).

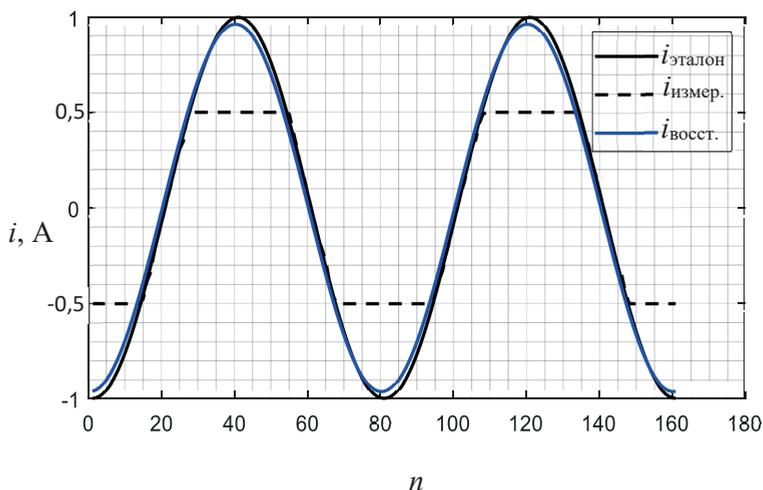


Рис. 1. График зависимости кривых эталонного, измеренного и восстановленного токов от количества отсчетов n

Существует множество факторов, которые оказывают влияние на возникновение насыщения магнитопроводов ТТ, одним из которых является вторичная нагрузка. В случае наличия большой вторичной нагрузки магнитопровод ТТ может насытиться в установившемся режиме. Тогда применение метода может стать основным инструментом, который позволит избежать влияния насыщения магнитопровода ТТ на корректность функционирования систем релейной защиты и автоматики электроэнергетических объектов.

В ходе вычислительных экспериментов выяснилось, что для корректного определения параметров модели (1) необходимым условием является наличие отсчета в малых окрестностях перехода через нулевое значение. Выполнение этого условия можно обеспечить путем повышения частоты дискретизации сигнала. В рамках настоящей работы частота дискретизации была задана равной 80 точек/период, что позволило получить отсчет, близкий к переходу через ноль.

Список источников

1. Ziegler G. Digital Differential Protection. Belo Horizonte, 2005. 314 p.
2. Раскулов Р. Ф. Погрешности ТТ. Влияние токов короткого замыкания // Новости электротехники. 2005. № 2 (32). С. 114–16.
3. Анализ неселективных действий дифференциальных защит сборных шин при внешних однофазных коротких замыканиях с насыщением трансформатора тока в неповрежденной фазе [Электронный ресурс] / С. Л. Кужеков [и др.] // Релейная защита. 2019. № 1. С. 28–36. URL: <https://ekra.ru/upload/iblock/522/statuya-1.pdf> (дата обращения: 07.12.2020).
4. An algorithm for compensating secondary current of current transformers [Electronic resource] / Y. C. Kang [et al.] // IEEE Transactions power delivery. 1997. Vol. 12, Iss. 1. P. 116–124. DOI: 10.1109/61.568231 (date of access: 07.12.2020).
5. Compensation of the distortion in the secondary current caused by saturation and remanence in a CT [Electronic resource] / Y. C. Kang [et al.] // IEEE Transactions power delivery. 2004. Vol. 19, Iss. 4. P. 1642–1649. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.835266 (date of access: 07.12.2020).
6. Hajipour E., Vakilian M., Sanaye-Pasand M. Current Transformer Saturation Compensation for Transformer Differential Relays [Electronic resource] // IEEE Trans. Power Deliv. 2015. Vol. 30, Iss. 5. P. 2293–2302. DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2411736 (date of access: 07.12.2020).
7. Анализ математических методов снижения погрешности ТТ в режиме насыщения [Электронный ресурс] / И. Н. Одинаев [и др.] // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2 (47). С. 11–18. DOI: 10.18503/2311-8318-2020-2(47)-11-18 (дата обращения: 07.12.2020).