

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТОКА, ИСКАЖЕННОГО ВСЛЕДСТВИЕ НАСЫЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА, ПО МАЛОМУ ЧИСЛУ ОТСЧЕТОВ

Лямец Ю. Я., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия.
E-mail: yu.ya.liamets@gmail.com.

Никонов И.Ю., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия,
ivan04031997@gmail.com.

Петряшин И.Е., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия,
E-mail: petry1405@mail.ru.

***Аннотация:** рассматривается задача цифрового восстановления тока, искаженного в результате насыщения трансформатора тока. Для решения этой задачи привлекается информация с участка неискаженной трансформации, а также с участка насыщения. Приведены примеры восстановления смоделированных токов и реальных токов, записанных терминалами релейной защиты.*

***Ключевые слова:** насыщение трансформатора тока, восстановление искажённого тока.*

Введение

В связи с повышением уровня токов короткого замыкания в электрических системах все более серьезной проблемой становится преодоление последствий насыщения трансформатора тока [1–3]. В настоящее время в цифровой релейной защите широкое применение нашли алгоритмы восстановления нелинейно искаженного тока, в основе которых лежит процедура сегментации – разделение тока на интервалы неискаженной трансформации и интервалы насыщения. Однако, интервалы неискаженной трансформации не всегда достаточно продолжительны для полноценного восстановления тока. В связи с этим возникает необходимость в объединении информации, полученной на этом интервале с информацией, доставляемой последующими интервалами – интервалом неискаженной трансформации, или же, что лучше для быстрой действия, соседним интервалом насыщения.

Принимаемые допущения

Модель тока полагается аддитивной с гармонической и аperiodической составляющей

$$i_{\text{сети}}(t) = i_{\text{гарм}}(t) + i_{\text{апер}}(t); \quad (1)$$

$$i_{\text{гарм}}(t) = I_{ms} \sin \omega t + I_{mc} \cos \omega t. \quad (2)$$

Длительное насыщение трансформатора тока вызывается медленно затухающей аperiodической составляющей, поэтому естественно принять, что изменение тока сети происходит вследствие изменения гармонической составляющей

$$\frac{di_{\text{сети}}(t)}{dt} = \frac{di_{\text{гарм}}(t)}{dt}; \quad (3)$$

Также предполагается совпадение наблюдаемого тока с током сети на участках неискаженной трансформации

$$i(t) = i_{\text{сети}}(t), \quad t \in (t_n, t_k), \quad (4)$$

где t_n и t_k - границы интервала данного типа.

Описанные допущения позволяют предположить, что на участке восстановления ток сети описывается выражением

$$i_{\text{сети}}(t) = I_{ms} \sin \omega t + I_{mc} \cos \omega t + I_0. \quad (5)$$

Информация с интервала неискажённой трансформации

Предполагается, что на интервале неискаженной трансформации доступно 2 отсчета тока в моменты времени t_1 и t_2 . Согласно допущению (4) ток на данном интервале будет соответствовать току сети, описываемому выражением (5).

Очевидно, что информации, поставляемой данными отсчетами недостаточно для разрешения выражения (5) относительно I_{ms} , I_{mc} и I_0 поэтому необходимо привлечение дополнительной информации, например, с соседнего участка искаженной трансформации.

Информация с интервала искажённой трансформации

В дополнение к трём ранее принятым допущениям, отражаемым выражениями (1)–(4), на интервале насыщения

необходимо принять ещё одно допущение о применимости линейной модели трансформатора тока с тремя неизвестными параметрами – дифференциальной индуктивностью ветви намагничивания $L_{\mu\text{диф}}$ и параметрами вторичной обмотки R и L .

Модель описывается двумя уравнениями:

$$L_{\mu\text{диф}} \frac{di_{\mu}(t)}{dt} = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt}; \quad (6)$$

$$\frac{di_{\mu}(t)}{dt} = \frac{di_c(t)}{dt} - \frac{di(t)}{dt}, \quad (7)$$

которые приводятся с учётом выражений (1) – (4) к одному уравнению с тремя неизвестными величинами и четырьмя известными функциями.

$$(\cos \omega t)x_1 - (\sin \omega t)x_2 - \left(\frac{di(t)}{dt}\right)x_3 = i(t); \quad (8)$$

$$x_1 = \frac{\omega L_{\mu\text{диф}}}{R} I_{ms}; \quad x_2 = \frac{\omega L_{\mu\text{диф}}}{R} I_{mc}; \quad x_3 = \frac{L_{\mu\text{диф}} + L}{R}.$$

Необходимую информацию несёт отношение двух первых неизвестных

$$\lambda = \frac{x_2}{x_1} = \frac{I_{mc}}{I_{ms}}. \quad (9)$$

Для его определения потребуются значения переменных коэффициентов в уравнении (8) в три момента времени t_3 , t_4 , t_5 , которые располагаются на интервале насыщения.

Информация с участка правильной трансформации дополняется отношением (9), после чего становится возможным разрешение выражения (5) относительно I_{ms} , I_{mc} и I_0 .

Апробация алгоритма

Рассматриваются осциллограммы токов КЗ, полученные путем математического моделирования, а также осциллограммы реальных процессов. Осциллограмма тока сети приводится

только в случае его моделирования. Восстановленный ток $\hat{i}(t)$ во всех случаях представлен пунктиром.

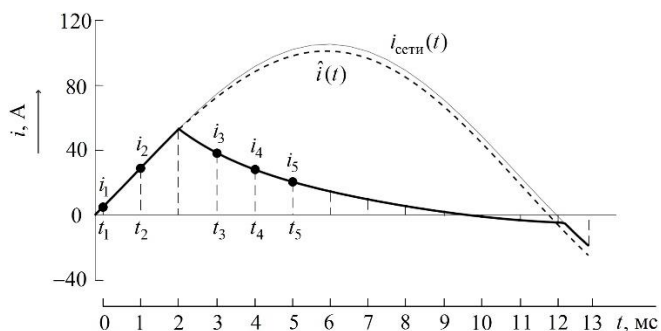


Рис.1. Пример восстановления тока, полученного с помощью программного комплекса Matlab/Simulink

Об эффективности восстановления тока в данном случае можно судить исходя из сравнения тока сети и восстановленного тока – они практически совпадают.

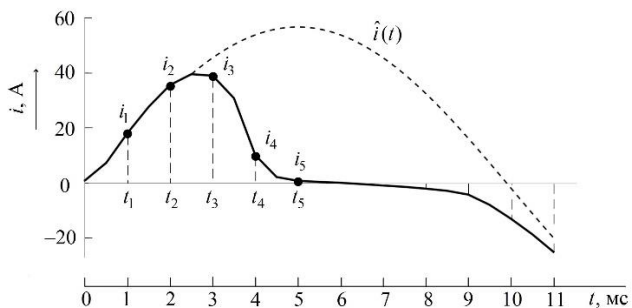


Рис.2. Пример восстановления тока реального КЗ

В данном случае не представляется возможным сравнить восстановленный ток с током сети, тем не менее о правильности процедуры восстановления можно судить исходя из сопоставления восстановленного тока с током на участках правильной трансформации.

Заключение

В основе процедуры восстановления искаженного тока лежит операция объединения информации с интервалов неискаженной и искаженной трансформации. Принятие допущений (1) - (4) и (6) - (7) позволяет ограничиться для восстановления двумя отсчетами тока на участке неискаженной трансформации и тремя – на участке искаженной. Об эффективности предлагаемого метода можно судить исходя из сопоставления восстановленного тока с током сети, либо с током на участках правильной трансформации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лямец, Ю.Я.* Мониторинг процессов в электрической системе / [Текст] / Ю.Я. Лямец, Ю.В. Романов, Д.В. Зиновьев // *Электричество*. - 2006. -- № 10. -- С. 2 -- 10; № 11. С. 2 - 10.

2. *Wiszniewski, A.* Correction of current transformer transient performance [Text] / A. Wiszniewski, W. Rebizant, L. Schiel // *IEEE Trans. Power Deliv.* – 2008. – Vol. 23. – No. 2. – P. 624 - 632.

3. *Кужеков, С.Л.* Анализ способов восстановления информации о первичном токе трансформатора тока, работающего с насыщением сердечника [Текст] / С.Л. Кужеков, А.А. Дегтярев, Б.Б. Сербиновский // *Релейная защита и автоматизация*. – 2017. -- № 3. – С. 43 - 51.

Авторы:

Лямец Юрий Яковлевич, ООО «Релематика»/ЧГУ им. И.Н. Ульянова, председатель НТС, окончил в 1962 г. энергетический факультет Новочеркасского политехнического института (НПИ). В 1994 г. защитил во ВНИИЭ докторскую диссертацию на тему «Адаптивные реле: теория и приложение к задачам релейной защиты и автоматики электрических систем», e-mail: yu.ya.liamets@gmail.com.

Никонов Иван Юрьевич, ООО «Релематика»/ЧГУ им. И.Н. Ульянова, инженер-исследователь, окончил в 2019 г. факультет Энергетики и Электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получил степень бакалавра по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», e-mail: ivan04031997@gmail.com.

Петряшин Илья Евгеньевич, ООО «Релематика»/ЧГУ им. И.Н. Ульянова, техник-исследователь, студент факультета Энергетики и Электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова по направлению «Релейная

*защита и автоматизация электроэнергетических систем», e-mail
petry1405@mail.ru.*