

УДК 621.31

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОРМ КРИВЫХ ТОКОВ ВО ВРЕМЯ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Н.С. Бурянина, Ю.Ф. Королюк, Е.И. Малеева, Е.В. Лесных, К.В. Суслов

Рассматриваются проблемы цифровой релейной защиты при появлении в токах аперiodических составляющих. Предложен алгоритм вычисления текущих значений вторичных токов, который основан на выборке для вычисления пяти значений и выдаче периодической составляющей на момент среднего измерения, а также алгоритм определения текущих значений токов в "будущие" моменты времени, в том числе и при насыщении магнитопроводов трансформаторов тока, когда требуется включать автоматику управления режимами.

Ключевые слова: аперiodические составляющие; вторичные токи; интервал дискретизации; цифровая релейная защита.

RESTORING THE SHAPES OF THE CURVES OF CURRENTS DURING SHORT CIRCUITS

N.S. Buryanina, Yu.F. Korolyuk, E.I. Maleeva, E.V. Lesnykh, K.V. Suslov

The problems of digital relay protection are considered when aperiodic components. An algorithm is proposed for calculating the current values of secondary currents, which is based on a sample for calculating five values, and issuing a periodic component at the time of the average measurement and, algorithm, determining the current values of currents at "future" instants, including saturation of the magnetic cores of current transformers, when it is required to enable automatic control of modes.

Keywords: aperiodic components; secondary currents; sampling interval; digital relay protection.

Релейную защиту (РЗ) можно рассматривать как управляющую систему, которая в общем случае получает информацию о токах, напряжениях и состоянии коммутационных элементов в отдельных пунктах ЭС. Цель релейной защиты – определение аномальных сигналов, представляющих неисправности в системе электропередач. Разрабатываются современные технологии поиска неисправностей в системах создания, передачи и потребления электроэнергии для обеспечения высокой скорости релейной защиты, быстрой и точной классификации неисправностей в ключевых точках, существующих в линии электропередачи.

Большинство аварий можно рассматривать локально, обрабатывая информацию только одного присоединения [1]. Для достоверности идентификации аварийных ситуаций в алгоритмах защиты предлагается использовать фильтрацию параметров режима разложением в ряд Фурье. Это увеличивает время идентификации. Кроме того, серьезные проблемы в осуществлении РЗ возникают при насыщении магнитопроводов трансформаторов тока. Время, в течение которого снимаемая с трансформаторов тока информация достоверна, может быть недостаточным для работы РЗ. Осо-

бенно это актуально при осуществлении РЗ цифровой техникой, требующей достаточно большого интервала времени. Задача усложняется, как правило, наличием в токах аперiodических составляющих, которые еще больше уменьшают интервал времени с достоверной информацией.

Ряд работ [2–4], посвященных определению места повреждения (ОМП), не учитывают наличия в аварийных параметрах режима аперiodических составляющих, что приводит к погрешности до 10–15 % от длины линии. Этот же недостаток присущ алгоритмам ОМП линий с ответвлениями [5].

В то же время применение цифровой техники для целей РЗ позволяет решить задачи как фильтрации аперiodических составляющих, так и восстановления формы кривых вторичных токов, поступающих на измерительные органы. Особенно это актуально для РЗ, прямо или косвенно определяющих направление в сторону короткого замыкания (КЗ) и для противоаварийной автоматики.

Форма кривой вторичного тока, снимаемого с трансформатора тока с насыщаемым магнитопроводом, имеет два характерных интервала: с комбинацией синусоидальной и аперiodической составляющих, определяемых параметрами

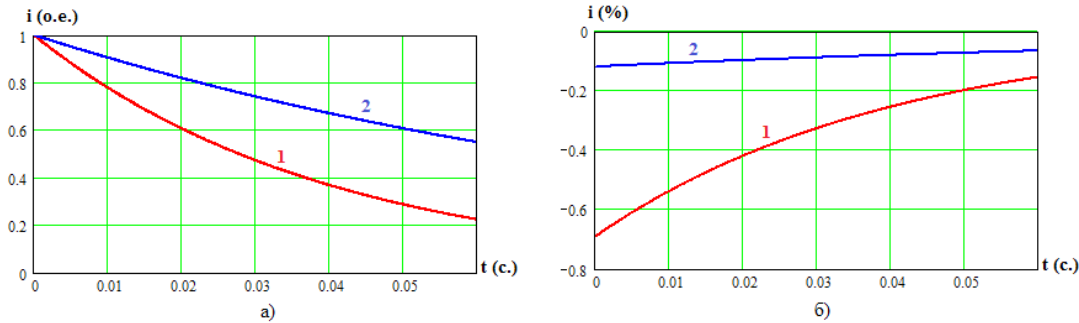


Рисунок 1 – Аперриодические слагающие тока – измеряемых и рассчитанных:
 1 – постоянная времени $T = 0,04$ с, 2 – 0,1 с; а – аперриодическая составляющая в измеряемом токе,
 б – в рассчитанном согласно (2)

защищаемого элемента электрической сети, и с аперриодической составляющей, определяемой параметрами трансформатора тока. Информация второго интервала для анализа режима недостоверна.

Рассмотрим алгоритм восстановления вторичного тока на втором интервале. Для этого воспользуемся определением текущего значения тока и его производной уравнениями, предложенными в [6] с той разницей, что интервал дискретизации принят равным меньшим четверти периода. При рекомендуемой частоте счѐта аналоговой информации в 1600 Гц интервал дискретизации равен 0,625 мс. Рассмотрим интервал времени от нуля до 3,5 мс. Согласно [2] текущее значение тока и его производная будут равны:

$$i(t) = \frac{2i(t) - i(t + 2\Delta t) - i(t - 2\Delta t)}{4 \sin^2(\omega \cdot \Delta t / 2)}, \quad (1)$$

$$\dot{i}(t) = \frac{i(t + \Delta t) - i(t - \Delta t)}{2 \sin(\omega \cdot \Delta t)}, \quad (1a)$$

где $i(t)$ – текущее значение тока в момент времени t ; $\dot{i}(t)$ – производная тока в момент времени t ; Δt – интервал дискретизации.

При интервале дискретизации, равном 0,625 мс, уверенное вычисление текущего значения тока выполняется через 3,125 мс (пять интервалов). КЗ может возникнуть на середине интервала, т. е. один интервал может не войти в уравнение (1).

Чтобы уменьшить время уверенного вычисления текущего значения тока и его производной, уменьшим интервал дискретизации в два раза, для чего воспользуемся следующими уравнениями:

$$i(t) = \frac{2i(t) - i(t + \Delta t) - i(t - \Delta t)}{4 \sin^2(\omega \cdot \Delta t / 4)}, \quad (2)$$

$$\dot{i}(t) = \frac{\frac{i(t + \Delta t) + i(t)}{2} - \frac{i(t) + i(t - \Delta t)}{2}}{2 \sin(\omega \cdot \frac{\Delta t}{2})}. \quad (2a)$$

Рассмотрим, каким образом можно исключить во вторичных токах аперриодическую составляющую. Максимальное значение аперриодической составляющей может быть равным амплитудному значению синусоидальной составляющей частоты сети $i_{am}(t) = e^{-\frac{t}{T}}$, где $T = \frac{L}{R}$.

В свою очередь

$$R_{\Gamma} = \frac{\Delta P}{I_H^2 \cdot 3}, \quad \text{где } \Delta P = P_H \cdot \frac{100 - \mu(\%)}{100}$$

$$X_{\Gamma} = X_d'' \cdot \frac{U_H^2}{S_{\Gamma} \cdot \omega}. \quad (3)$$

При коэффициенте полезного действия $\eta = 0.97 \div 0.98$, постоянная времени не может быть меньше 0,04 с.

Уравнения (1) и (2) позволяют уменьшить в вычисленных текущего значения тока и его производной аперриодической составляющей. Объясняется это тем, что в обоих уравнениях в числителях вычисляются разности однополярных величин. На рисунке 1 приведены величины аперриодических составляющих в вычисленных параметрах.

При использовании уравнения (1) текущее значение тока вычисляется с максимальной погрешностью в 0,7 %, что меньше класса точности трансформаторов тока, применяемых в цепях релейной защиты.

Для момента времени t фазу тока короткого замыкания можно определить, как

$$\phi = \arccos\left(\frac{\dot{i}(t_i)}{i(t_i)}\right), \quad (4)$$

где t_i – произвольный момент времени. Если текущее значение тока и его производная отрицательные, то угол

$$\phi = \arccos\left(\frac{\dot{i}(t_i)}{i(t_i)}\right) + \pi. \quad (5)$$

Чтобы не менять интервал дискретизации, т. е. оставить его для остальных защит и оставить время обработки сигналов для осуществления РЗ, воспользуемся тем обстоятельством, что всегда модуль синусоидальной составляющей неизменен в течение периода, если режим электрической сети неизменен. При отсутствии насыщения магнитопроводов трансформаторов тока производная тока отстает от текущего значения на четверть периода, т. е.

$$i'(t) = \sin(\omega \cdot t + n \cdot \omega \cdot \Delta t) \cdot k, \quad (6)$$

где n – число интервалов дискретизации, соответствующему четверти периода; k – отношение вычисленного текущего значения параметра к синусу угла, соответствующего t , ω – угловая частота.

Если частота сети равна 50 Гц, время, необходимое для получения информации при использовании уравнений (1а) при интервале дискретизации, равном 0,625 мс, составляет 2,5 мс, а при (2а) – 1,25 мс.

Чтобы исключить влияние изменения частоты, а именно постоянной интервала дискретизации на погрешность вычисления текущего значения параметров режима сети, интервал дискретизации должен устанавливаться интервалами перехода через нуль напряжений на активном сопротивлении и емкости RC-звена [7]. Эти переходы всегда соответствуют четверти периода частоты. При частоте сети, равной номинальной, и частоте дискретизации, равной 1600 Гц, интервал дискретизации будет равен 0,625 мс, или 32 измерения за период.

Используя интервал времени, когда магнитопроводы трансформаторов тока не насыщаются, можно определить текущее значение тока и их производные в любой момент времени:

$$i(t) = \sin \left[\arcsin \left(\frac{i'(t_i)}{i(t_i)} \right) + \omega(t) \right] \cdot \frac{i(t_i)}{\sin(\omega \cdot t_i)} \quad (7)$$

$$i(t) = \sin \left[\arcsin \left(\frac{i'(t_i)}{i(t_i)} \right) + \omega(t) + \frac{\pi}{2} \right] \cdot \frac{i(t_i)}{\sin(\omega \cdot t_i)} \quad (8)$$

где t_i – время фиксации достоверного i -го измерения тока.

Производную тока также можно определить через косинус:

$$i(t) = \cos \left[\arcsin \left(\frac{i'(t_i)}{i(t_i)} \right) + \omega(t) \right] \cdot \frac{i(t_i)}{\sin(\omega \cdot t_i)}. \quad (8a)$$

Используя уравнения (7), (8) или (8а) можно определить текущие значения токов и их производные в любой момент времени, в том числе и в моменты времени, когда насыщаются трансформаторы тока. Производную тока, вычисленную

согласно (8) или (8а) можно определять таблично, заложив таблицу синусов и косинусов в память вычислительной машины. Это позволит уменьшить время обработки результатов измерений. Уравнения (8) и (8а) позволяют определить параметры вторичных токов в “будущем” времени. Это актуально для выработки решений действий автоматики.

При наличии в токах аperiodических составляющих использование уравнений (7), (8) или (8а) приводит к погрешности в определении производных до 2,5 %, если постоянная времени сети равна 0,04 с, и снижается до 1,1 % при постоянной времени, равной 0,1 с. Такая точность достаточна для правильной работы релейных защит и противоаварийной автоматики, но нежелательна для применения алгоритмов ОМП, использующих параметры установившегося режима.

Точность вычислений синусоидальных составляющих текущих значений токов по (1) при максимальной величине аperiodической составляющей не превышает 0,3%. Но производные токов, определяемые по (1а) имеют погрешности от 3 до 8 % при изменении постоянной времени сети от 0,1 до 0,04 с. Это приводит к погрешности до 2,5 % при вычислении производных по (8) и (8а). Объясняется это неточным вычислением угла

$$\arcsin \left(\frac{i'(t_i)}{i(t_i)} \right).$$

С такой погрешностью можно согласиться при осуществлении релейных защит, но она неприемлема при определении места аварии, особенно на длинных линиях. Для снижения погрешности до долей процентов предлагается применить уравнение (1) к вычисленным производным, если нет насыщения магнитопроводов трансформаторов тока. При интервале дискретизации в 0,625 мс, время наблюдения за режимом должно быть не меньше половины периода при условии ненасыщения магнитопроводов трансформаторов тока. Это можно определить по осциллограмме после отключения поврежденной линии.

Таким образом, при насыщении магнитопроводов трансформаторов тока вторичные токи “не повторяют” первичные. Причиной насыщения магнитопроводов, как правило, является появление аperiodических составляющих в токе короткого замыкания. Время существования аperiodической составляющей в токе короткого замыкания зависит от постоянной времени участка электрической сети от места короткого замыкания до генераторов. Чем больше постоянная времени, тем дольше сохраняется несоответствие между первичными и вторичными токами трансформаторов тока.

Время, в течение которого нарушается пропорция между первичными и вторичными токами, может достигать половины времени и более существования короткого замыкания.

Апериодическая составляющая искажает вторичную периодическую, что может привести к отказам релейной защиты, выражающихся либо к ложной работе (при коротком замыкании не на защищаемом объекте), либо к не реагированию защиты при коротком замыкании на защищаемом объекте.

Разработанный алгоритм предлагается применять с момента возникновения короткого замыкания для защиты объектов электрической сети с постоянными времени более 0,01–0,02 с и с задержкой на половину периода при меньших постоянных времени. Погрешность в вычислении амплитуд, мощностей, сопротивлений и других вторичных параметров не превышает 5 %. Причем, чем больше постоянная времени сети, тем меньше погрешность в вычислении указанных вторичных параметров.

Статья подготовлена при выполнении Государственного контракта № 5327 от 08.08.2017 г. в рамках комплексных научных исследований в Республике Саха (Якутия), направленных на развитие производительных сил и социальной сферы на 2016–2020 гг.

Литература

1. Шнеерсон Э.В. Цифровая релейная защита / Э.В. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
2. Аржанников Е.А. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / Е.А. Аржанников, В.Ю. Лукоянов, М.Ш. Мисриханов. М.: Энергоатомиздат, 2003. 271 с.
3. Saha M. Fault Location on Power Networks. London / M. Saha, J. Izykowski, E. Rosolowski // Springer, 2010. 425 с.
4. Куликов А.Л. Развитие программного обеспечения для поддержки принятия решения при ликвидации повреждения на ЛЭП / А.Л. Куликов, М.Д. Обалин // Известия вузов. Электромеханика. 2015. № 2. С. 70–75.
5. Куликов А.Л. Алгоритм определения места повреждения линии электропередачи с ответвлениями / А.Л. Куликов, В.Ю. Вуколов, М.В. Шарыгин, Д.И. Бездушный, Ж. Темирбеков // Вестник НГИЭИ. 2017. № 9 (76). С. 29–38.
6. Грешнов Е.Б. О выборе интервала дискретизации вводимых в ЭВМ аналоговых параметров для программируемых защит / Е.Б. Грешнов, Ю.Ф. Королюк // Электронное моделирование. 1982. № 5. Киев. С. 71–74.
7. Способ отсчета мгновенных значений напряжений и токов // Патент РФ 2 625 172 RU; заявл. 17.07.2016; опубл. 12.07.2017. Бюл. № 20. 6 с.