

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ТОКОВ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Авторами предложены и исследованы методом вычислительного эксперимента алгоритмы формирования токов обратной последовательности. В результате проделанной работы сделан вывод о наиболее приемлемом алгоритме, в том числе по показателям быстродействия и чувствительности. Предложенный алгоритм может быть использован для реализации защиты линий электропередачи распределительных сетей напряжением 6–35 кВ от несимметричных повреждений с контролем токов обратной последовательности.

Ключевые слова: энергетика, релейная защита, токовая защита, обратная последовательность



Ф.А. РОМАНИУК,
член-корреспондент
НАН Беларуси, д.т.н.,
профессор БНТУ

Annotation

The authors have proposed and studied by computational experiment the algorithms of forming negative phase-sequence currents. As a result of this work the researches chosen the most appropriate algorithm, including the speed and sensitivity parameters. The proposed algorithm can be used to implement in the distribution network 6-35 kV for the protection of power lines from asymmetrical faults with control of negative phase-sequence currents.

Key words: power engineering, relay protection, overcurrent protection, negative phase-sequence.

Статья поступила в редакцию 5 июля 2016 года



В.Ю. РУМЯНЦЕВ,
к.т.н., доцент, заместитель
декана по научной
работе энергетического
факультета БНТУ

Введение

Для защиты линий электропередачи распределительных сетей 6–35 кВ Белорусской энергосистемы традиционно применяются токовые защиты, реагирующие на составляющие тока прямой последовательности. Это связано, в первую очередь, с относительной простотой реализации таких защит на электромеханической элементной базе.

Существенно повысить показатели технического совершенства токовых защит при несимметричных коротких замыканиях (КЗ) возможно в случае контроля токов обратной последовательности. Так, устройство защиты с использованием информации о месте несимметричного повреждения, определенного по величине тока обратной последова-

тельности, обеспечило бы отключение несимметричных КЗ на большей части защищаемой линии электропередачи распределительной сети первой ступенью защиты без выдержки времени, а ее вторая ступень осуществляла бы полноценное ближнее и дальнее резервирование [4].

В силу сложности реализации таких защит на электромеханической и микроэлектронной элементной базе они не нашли массового применения в распределительных сетях, а использовались лишь для защиты отдельных элементов электрической сети, в частности синхронных генераторов и трансформаторов.

Появление и развитие микропроцессорной элементной базы позволило су-



М.А. ШЕВАЛДИН,
м.т.н., аспирант БНТУ,
начальник отдела РЗА
ГПО «Белэнерго»

щественно упростить реализацию отдельных функций релейной защиты. Данный факт касается и развития защит, реагирующих на ток обратной последовательности.

Исследованию возможности использования защит линий электропередачи распределительных сетей, реагирующих на токи обратной последовательности, посвящены работы [1–3]. Однако данные разработки фактически не получили распространения, что обусловлено как сложностью алгоритмов формирования токов обратной последовательности и трудностями использования предложенных методик согласования уставок защит, так и традиционными подходами к выполнению защит линий электропередачи распределительных сетей.

В настоящей статье рассматриваются различные алгоритмы формирования токов обратной последовательности, принципы работы которых не сложнее традиционных алгоритмов работы токовых защит, реагирующих на составляющие тока прямой последовательности.

Принципы вычисления токов обратной последовательности

Общие принципы выполнения токовой защиты обратной последовательности от несимметричных повреждений для линий электропередачи распределительных сетей изложены в [4]. Контролируемой величиной в указанной защите является ток обратной последовательности I_2 . В основу формирования I_2 может быть положено последовательное аналоговое и цифровое преобразование мгновенных значений входных токов фаз i_a, i_b, i_c , поступающих от измерительных трансформаторов тока. Если в результате такого преобразования получены ортогональные составляющие (ОС) тока обратной последовательности – синусная i_{s2} и косинусная i_{c2} , – то его значение определяется по выражению

$$I_2 = \sqrt{\frac{i_{s2}^2 + i_{c2}^2}{2}}. \quad (1)$$

Синусная i_{s2} и косинусная i_{c2} ОС формируются путем цифровой обработки синусных i_{as}, i_{bs}, i_{cs} и косинусных i_{ac}, i_{bc}, i_{cc} ОС токов фаз с использованием следующих выражений [5]:

$$i_{s2} = \frac{1}{3}(i_{as} - 0,5i_{bs} - 0,5\sqrt{3}i_{bc} - 0,5i_{cs} + 0,5\sqrt{3}i_{cc}), \quad (2)$$

$$i_{c2} = \frac{1}{3}(i_{ac} - 0,5i_{bc} + 0,5\sqrt{3}i_{bs} - 0,5i_{cc} - 0,5\sqrt{3}i_{cs}). \quad (3)$$

Выражения (2) и (3) представляют собой пару цифровых фильтров тока обратной последовательности.

Для получения ОС фазных токов, содержащихся в (2) и (3), целесообразно использовать соответствующие формирователи, которые также обеспечивают частотную фильтрацию входных токов фаз. Принципы реализации таких формирователей изложены в [5].

Если на интервале наблюдения за входными токами фаз m ($j = a, b, c$) зафиксировано n отсчетов их мгновенных значений через шаг Δt , то, используя из них m отсчетов ($m \leq n$),

отделенных друг от друга интервалом ΔT ($\frac{\Delta T}{\Delta t}$ – целое число),

значения синусной i_{js} и косинусной i_{jc} ОС указанных токов на конец интервала наблюдения можно определить по выражениям [6]

$$i_{js} = \sum_{l=1}^m a_l i_{jl}, \quad (4)$$

$$i_{jc} = \sum_{l=1}^m b_l i_{jl}, \quad (5)$$

где a_l и b_l – постоянные, $j = a, b, c$.

Выражения (4) и (5) представляют собой цифровые формирователи ОС вторичных токов фаз, которые, в сущности, являются парами цифровых частотных фильтров. В дальнейшем выражение (4) будем называть синусным фильтром, а (5) – косинусным фильтром.

Коэффициенты фильтров a_l и b_l определяются основной частотой ω_0 , а также значениями m и ΔT .

Для получения ОС фазных токов в процессе формирования тока обратной последовательности могут быть использованы формирователи с оптимальным сочетанием частотных и динамических свойств при их реализации с параметрами $m = 14$ и $\Delta T = 1,5$ мс, описанными в [7].

С помощью синусного фильтра (4) могут быть сформированы отсчеты синусных ОС фазных токов, которые изменяются по закону:

$$i_{js}(t) = I_{jmax} \sin(\omega_0 t), \quad (6)$$

где I_{jmax} – амплитуда тока соответствующей фазы, $j = a, b, c$.

Если зафиксировать три последовательных отсчета $i_{js(m-2)}, i_{js(m-1)}$ и i_{jsm} синусных составляющих (6) через интервал ΔT , то связь между ними описывается следующей системой соотношений:

$$i_{jsm} = I_{jmax} \sin \phi_{jm},$$

$$i_{js(m-1)} = I_{jmax} \sin(\phi_{jm} - \omega_0 \Delta T), \quad (7)$$

$$i_{js(m-2)} = I_{jmax} \sin(\phi_{jm} - 2\omega_0 \Delta T),$$

$$j = a, b, c.$$

Разрешив (7), получим выражения для определения отсчетов косинусных ОС фазных токов, соответствующих синусным ОС для одного и того же момента времени:

$$i_{jcm} = \frac{i_{jsm} \left| \frac{i_{js(m-2)} + i_{jsm}}{2i_{js(m-1)}} - i_{js(m-1)} \right|}{\sqrt{1 - \left(\frac{i_{js(m-2)} + i_{jsm}}{2i_{js(m-1)}} \right)^2}}. \quad (8)$$

Если зафиксировать два последовательных отсчета $i_{js(m-1)}$ и i_{jsm} синусных составляющих (6) через интервал ΔT , то они связываются следующими соотношениями:

$$i_{jsm} = I_{jmax} \sin \phi_{jm},$$

$$i_{js(m-1)} = I_{jmax} \sin(\phi_{jm} - \omega_0 \Delta T), \quad (9)$$

$$j = a, b, c.$$

Разрешив (9), получим выражение для определения отсчетов косинусных ОС фазных токов:

Таблица 1. Возможные варианты алгоритмов формирования тока обратной последовательности

Номер варианта	Формирование ОС фазных токов	Формирование ОС тока обратной последовательности	Определение тока обратной последовательности
1	Выражения (4) и (5)	Выражения (2) и (3)	Выражение (1)
2	Выражения (4) и (8)	Выражения (2) и (3)	Выражение (1)
3	Выражения (4) и (10)	Выражения (2) и (3)	Выражение (1)
4	Выражения (8) со знаком «минус» и (5)	Выражения (2) и (3)	Выражение (1)
5	Выражения (10) со знаком «минус» и (5)	Выражения (2) и (3)	Выражение (1)

$$i_{jcm} = \frac{i_{jsm} \cos(\omega_0 \Delta T) - i_{js(m-1)}}{\sin(\omega_0 \Delta T)}, \quad (10)$$

$$j = a, b, c.$$

С помощью косинусного фильтра (5) могут быть сформированы отсчеты косинусных ОС фазных токов, изменяющихся по закону:

$$i_{jc}(t) = I_{j\max} \phi_{jm}, \quad (11)$$

$$j = a, b, c.$$

По трем последовательным отсчетам $i_{jc(m-2)}$, $i_{jc(m-1)}$ и i_{jcm} косинусных составляющих (11), зафиксированным через интервал ΔT , определяют синусные ОС с использованием выражения (8), которое берется со знаком «минус».

Аналогичным образом с использованием (11) формируются синусные ОС фазных токов по двум последовательным отсчетам $i_{jc(m-1)}$ и i_{jcm} косинусных составляющих.

Формирование ОС входных токов фаз является началом этапа их цифровой обработки, которому предшествует аналоговое преобразование. Указанное преобразование включает получение сигналов напряжения, пропорциональных входным токам, и их последующую аналоговую частотную фильтрацию. Применительно к формирователям ОС с указанным выше числом отсчетов $m = 14$ для предварительной фильтрации подходят аналоговые фильтры второго порядка с частотой среза 160 Гц.

Алгоритмы формирования тока обратной последовательности

Обобщая изложенное выше, алгоритм формирования тока обратной последовательности представим как реализацию совокупности аналоговых и цифровых операций:

- аналоговое преобразование входных токов фаз в пропорциональные сигналы напряжения;
- предварительная аналоговая фильтрация токов фаз, представленных сигналами напряжения;
- аналого-цифровое преобразование полученных в результате фильтрации сигналов;
- цифровая фильтрация токов фаз и формирование их ортогональных составляющих;
- цифровое формирование ортогональных составляющих тока обратной последовательности;
- определение тока обратной последовательности.

Описанные операции являются основой для разработки ряда вариантов алгоритма формирования тока обратной последовательности. Эти варианты будут существенно различаться по организации цифровой фильтрации токов фаз и формированию их ОС (таблица 1).

Исследование предложенных алгоритмов методом вычислительного эксперимента

Исследование работоспособности и эффективности предложенных вариантов алгоритма формирования тока обратной последовательности выполнялось методом вычислительного эксперимента. Его реализация основывается на программном комплексе, позволяющем воспроизводить математическую модель узла распределительной сети, включающего защищаемую линию, и математические модели вариантов алгоритма формирования тока обратной последовательности.

Исследования выполнялись при работе защищаемой линии в нормальном режиме как на холостом ходу, так и при токе нагрузки, равном 150 А, а также при повреждениях в различных точках линии.

Следует отметить, что амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) различных вариантов алгоритма формирования тока обратной последовательности целиком определяются АЧХ соответствующих формирователей ОС фазных токов и приводятся в [7].

В результате выполненных методом вычислительного эксперимента исследований установлено следующее.

Во всех асимметричных режимах работы линии для каждого из вариантов алгоритма формирования I_2 характерно наличие небольшого тока обратной последовательности, представляющего собой ток небаланса. Относительное значение этого тока $I_{нб}$ зависит от первичного тока в защищаемой линии.

В режиме нагрузки линии с током 150 А значения $I_{нб}$ для всех вариантов алгоритма не превышают 0,0025. При трехфазных КЗ в начале линии (рис. 1) $I_{нб}$ достигает наибольших уровней, которые в установившемся режиме для некоторых вариантов могут быть равны 0,02. По мере удаления точки трехфазного КЗ от источника питания уровни токов $I_{нб}$ снижаются.

В переходных режимах трехфазных повреждений переходный процесс имеет примерно одинаковый характер, а численные значения $I_{нб}$ соответствуют вариантам 1–3 алгоритма формирования I_2 . Варианты 4 и 5 отличаются более плохими показателями $I_{нб}$, как в качественном, так и в количественном отношении.

Следует отметить, что длительность переходного процесса для всех вариантов алгоритма формирования I_2 составляет не менее 0,15 с, что необходимо учитывать при выборе параметров срабатывания защиты обратной последовательности.

Показателем быстродействия вариантов формирования I_2 является длительность переходного процесса, равная интервалу времени с момента возникновения несимметричного повреждения до момента времени, когда I_2 не будет отличаться от установившегося значения более чем на 5%.

На рисунке 2 приведены переходные характеристики для различных алгоритмов формирования тока I_2 при несимметричных КЗ.

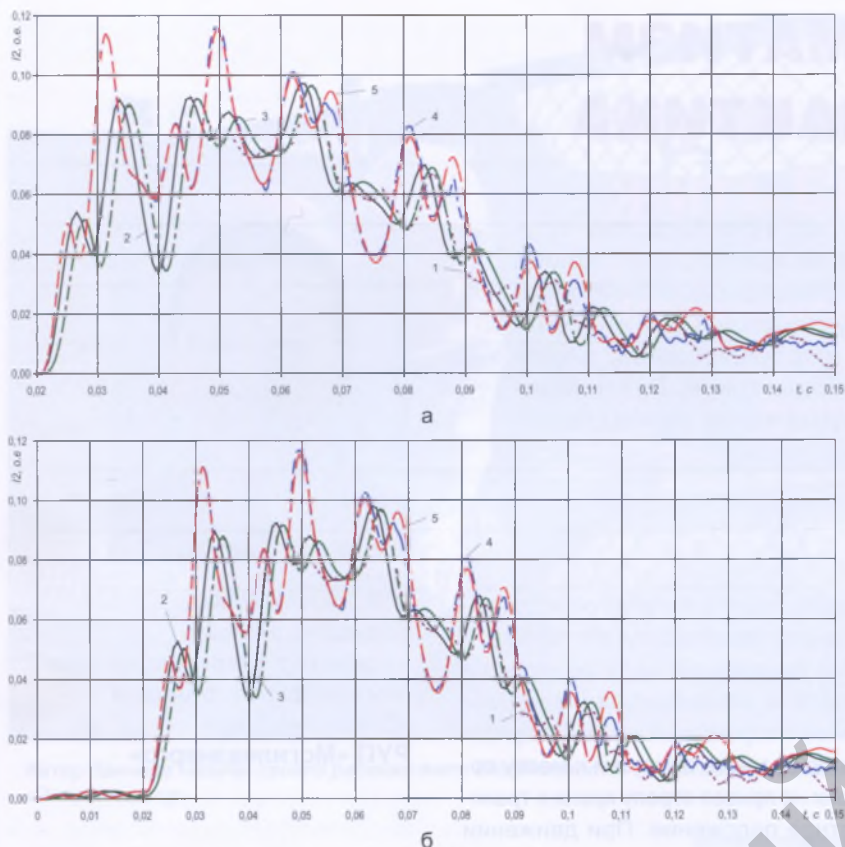


Рис. 1. Относительное значение тока небаланса в режиме трехфазного КЗ в начале линии для различных алгоритмов формирования тока I_2 : а – исходный режим холостого хода; б – исходный режим нагруженный: 1–5 – для вариантов 1–5 алгоритма соответственно

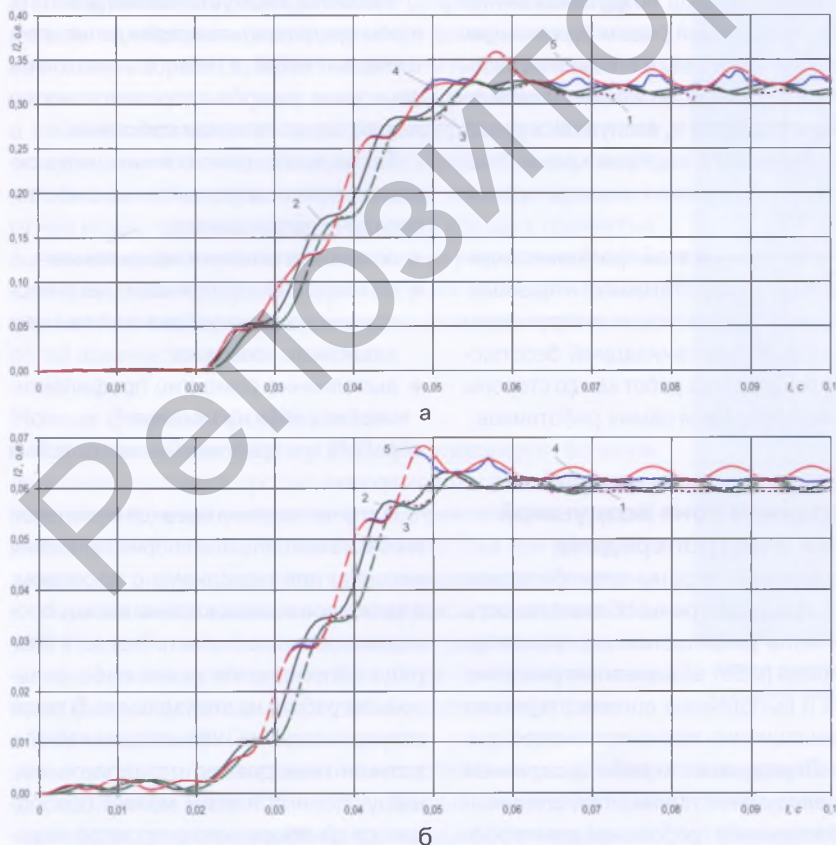


Рис. 2. Переходные характеристики различных вариантов алгоритма формирования тока I_2 при несимметричных КЗ: а – в начале линии; б – в конце линии: 1–5 – для вариантов 1–5 алгоритма соответственно

Как видно из представленных зависимостей, быстрдействие всех вариантов алгоритма формирования I_2 составляет порядка 1,5 периодов промышленной частоты. Варианты 1–3 алгоритма имеют примерно одинаковый характер переходного процесса. Для вариантов 4 и 5 алгоритма характерна большая колебательность сформированного тока I_2 . С целью ее подавления использовано усреднение I_2 по 4-5 его значениям.

Вывод

Для формирования тока обратной последовательности рекомендуется вариант 2 алгоритма, как отличающийся минимальной чувствительностью к изменениям промышленной частоты вследствие реализованных особенностей в формирователе ОС фазных токов и не уступающий по всем показателям другим вариантам алгоритма.

Список литературы

1. Elnewehi, A.F. Negative-Sequence Overcurrent Element Application and Coordination in Distribution Protection // A.F. Elnewehi, E.O. Schweitzer III, M.W. Feltis / IEEE Transactions on Power Delivery, volume 8, issue 3 (92 SM 372-3 PWRD), Seattle, USA, July 1993, p. 1–9.
2. Calero, F. Rebirth of Negative-Sequence Quantities in Protective Relaying With Microprocessor-Based Relays // Fernando Calero, 30th Annual Western Protective Relay Conference, October 2003, p. 1–30.
3. Маруда, И.Ф. Повышение эффективности релейной защиты электрических распределительных сетей 110–220 кВ при несимметричных повреждениях: автореф. дис. канд. технических наук / И.Ф. Маруда. – Новочеркасск, 2003. – 183 с.
4. Романюк, Ф.А. Повышение чувствительности токовой защиты к несимметричным повреждениям на линиях электропередачи напряжением 6–35 кВ / Ф.А. Романюк, М.А. Шевалдин // Энергетика и ТЭК. – 2016. – № 4. – С. 23–25.
5. Романюк, Ф.А. Информационное обеспечение микропроцессорных защит электроустановок: учеб. пособие / Ф.А. Романюк. – Минск: УП «Технопринт», 2001. – 133 с.
6. Романюк, Ф.А. Принципы выполнения гибких формирователей ортогональных составляющих входных величин в микропроцессорных защитах электроустановок / Ф.А. Романюк, В.Ю. Румянцев, К.Ф. Романюк // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2012. – № 6. – С. 5–10.
7. Романюк, Ф.А. Совершенствование алгоритма формирования ортогональных составляющих входных величин в микропроцессорных защитах линий распределительных сетей / Ф.А. Романюк, М.А. Шевалдин // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2014. – № 1. – С. 5–11.