

УДК 111.111

Исследование алгоритма устройства блокировки релейной защиты при качаниях

Д.Н. Кокоулин, В.А. Шуин
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
Иваново, Российская Федерация
E-mail: rza@rza.ispu.ru, kokoulin_d_n@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Устройства блокировки при качаниях являются важным функциональным органом устройств релейной защиты, обеспечивающим правильное функционирование последних при внешних и внутренних коротких замыканиях, сопровождаемых синхронными качаниями, в электроэнергетической системе. Микропроцессорная элементная база и современные методы цифровой обработки сигналов обеспечивают возможности совершенствования существующих алгоритмов блокировки релейной защиты при качаниях. Наиболее эффективным методом исследования алгоритмов блокировки при качаниях и обоснования параметров настройки их пусковых органов является моделирование на ЭВМ.

Материалы и методы: Исследование алгоритма блокировки при качаниях проводилось на математической модели, разработанной в среде Mathcad.

Результаты: Разработана математическая модель для анализа режимов качаний в электроэнергетической системе и исследования алгоритмов блокировки устройств релейной защиты при синхронных качаниях. По результатам математического моделирования и последующего анализа получены значения коэффициентов небаланса, характеризующие чувствительность блокировки при качаниях.

Выводы: Использование полученных результатов позволит повысить чувствительность и быстродействие пусковых органов блокировки при качаниях, сопровождаемых короткими замыканиями, а также устойчивость несрабатываний в режимах без коротких замыканий, сопровождаемых синхронными качаниями.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, качания, релейная защита, устройство блокировки при качаниях, аварийные составляющие, коэффициент небаланса, моделирование на ЭВМ.

Algorithm Research of Blocking Equipment of Relay Protection while Swinging

D.N. Kokoulin, V.A. Shuin
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: rza@rza.ispu.ru, kokoulin_d_n@mail.ru

Abstract

Background: Blocking equipment while swinging is the important functional part of the relay protection devices. It provides the right devices functioning in external and internal faults accompanied with synchronous swingings in the electric power system. Microprocessor-based data and modern methods of digital signal processing give the opportunities to improve the present algorithms of relay protection blocking while swingings. The most effective method to research the blocking algorithms with swingings and to explain the settings of the starting units is the computer simulation method.

Materials and methods: Researches the blocking algorithms with swingings are held on the basis of mathematical models, developed in the Mathcad environment.

Results: The mathematical model for analyzing the swinging regimes in the electrical engineering system as well as for researching blocking algorithms for relay protection devices while synchronous swingings is developed. According to the results of the mathematical simulation the meanings of misbalance coefficients, characterizing the blocking sensitivity while swingings and further analyses were received.

Conclusions: The usage of the received results allows to enhance sensitivity and promptitude of blocking starting units in emergency conditions (short faults), as well as stability of failures in regimes without short faults but with synchronous swingings.

Key words: electrical engineering systems, swingings, relay protection, blocking equipment while swinging, emergency components, coefficient of misbalance, computer simulation.

Введение. Синхронные качания – режим энергосистемы, при котором происходят периодические изменения его параметров (токов, напряжений) без нарушения синхронизма [1]. Качания возникают при нарушении синхронной работы генераторов электростанций электроэнергетической системы (ЭЭС), а также при подключении или отключении большой актив-

ной нагрузки, по величине соизмеримой с мощностью нагрузки потребителей данной энергосистемы.

В нормальном (синхронном) режиме угол $\delta_{\text{норм}}$ между ЭДС E_1 генерирующей системы S_1 и ЭДС E_2 потребляющей системы S_2 находится обычно в пределах от 0 до 45 градусов

(рис. 1). В этом режиме по линии связи между системами S1 и S2 протекает ток нагрузки.

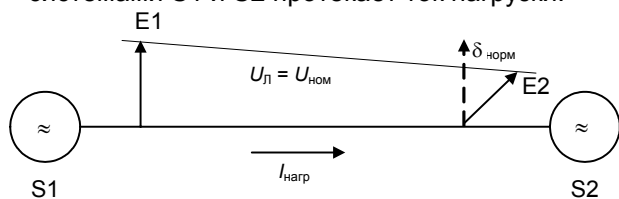


Рис. 1. Нормальный (синхронный) режим работы двух систем: S1, S2 – энергосистемы; E1, E2 – ЭДС первой и второй системы соответственно; $\delta_{\text{норм}}$ – угол сдвига между ЭДС систем; $I_{\text{нагр}}$ – ток нагрузки

При возникновении синхронных качаний вектор ЭДС E2 начинает колебаться по отношению к вектору ЭДС E1. Периодические изменения угла δ между векторами ЭДС E1 и E2 сопровождаются протеканием по линии связи уравнительного тока и периодическими изменениями напряжений по ее концам. Синхронные качания продолжаются, как правило, примерно 4–5 периодов, после чего устанавливается новый нагрузочный режим с углом $\delta_{\text{норм}}$ большим, чем в предшествующем режиме, но в пределах допустимого.

Значения уравнительного тока качаний в линии связи и напряжений по ее концам соизмеримы со значениями токов и напряжений при коротких замыканиях (КЗ), что обуславливает возможность отказов функционирования некоторых устройств релейной защиты (УРЗ), прежде всего дистанционных защит (ложных срабатываний, излишних срабатываний, отказов срабатывания). Для исключения отказов функционирования УРЗ применяются устройства их блокировки при качаниях (УБК), использующие различные алгоритмы функционирования.

Практическое применение получили два основных принципа выполнения УБК, использующие для распознавания режимов качаний и КЗ [2, 3]:

1) появление при КЗ несимметрии трехфазной системы токов или напряжений (при трехфазных КЗ хотя бы кратковременно) и отсутствие несимметрии (или малые ее значения) в режимах качаний;

2) наличие существенных изменений (приращений) электрических величин за малые промежутки времени при КЗ и незначительные изменения этих же величин за такие же малые промежутки времени при качаниях, что обусловлено более плавными изменениями величин при качаниях в ЭЭС, по сравнению с изменениями при КЗ.

В России более широкое применение получили УБК первого из указанных выше типов [4]. К таким устройствам относятся, в частности, получившие применение в цифровых УРЗ УБК с пусковыми органами (ПО), контролирующими аварийные составляющие токов

прямой и обратной последовательностей. Эффективность функционирования таких УБК зависит от алгоритма вычисления аварийных составляющих токов прямой и обратной последовательностей.

Ниже приводятся результаты исследований эффективности алгоритма УБК с ПО, контролирующими аварийные составляющие токов прямой и обратной последовательностей, в различных условиях функционирования и методика практического определения параметров настройки его ПО.

Алгоритм УБК и расчетные условия исследования эффективности его функционирования. Обобщенная функционально-логическая схема ПО УБК, выполненного с использованием указанного выше алгоритма, представлена на рис. 2.

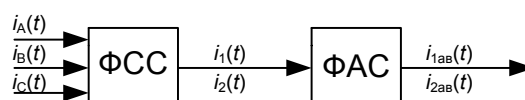


Рис. 2. Общая функциональная схема ПО УБК, основанного на выделении аварийных составляющих токов прямой и обратной последовательностей: $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ – мгновенные значения токов фазы А, В и С соответственно; ФСС – фильтры симметричных составляющих; $i_1(t)$, $i_2(t)$ – мгновенные значения токов прямой и обратной последовательностей; ФАС – фильтры аварийных составляющих; $i_{1ав}(t)$, $i_{2ав}(t)$ – аварийные составляющие токов прямой и обратной последовательностей

Согласно схеме (рис. 2), на первом этапе происходит формирование токов прямой и обратной последовательностей из фазных токов с помощью фильтров симметричных составляющих (ФСС). Затем токи прямой и обратной последовательностей поступают на вход фильтра аварийных составляющих (ФАС). На выходе ФАС формируются значения аварийных составляющих тока прямой и обратной последовательностей.

В предложенном алгоритме величины (токи прямой и обратной последовательностей) рассчитываются по выражениям:

$$i_{1i} = \frac{\dot{I}_{A_i-N_0} + K_1 \left(\dot{I}_{B_i} - \dot{I}_{C_i} \right) - K_2 \dot{I}_{B_i-N_0} + K_3 \dot{I}_{C_i-N_0}}{3}; \quad (1)$$

$$i_{2i} = \frac{\dot{I}_{A_i-N_0} + K_1 \left(\dot{I}_{C_i} - \dot{I}_{B_i} \right) - K_2 \dot{I}_{C_i-N_0} + K_3 \dot{I}_{B_i-N_0}}{3}, \quad (2)$$

где \dot{I}_A , \dot{I}_B , \dot{I}_C – значения токов фазы А, В и С; \dot{I}_1 , \dot{I}_2 – значения токов прямой и обратной последовательностей; K_1 , K_2 , K_3 – значения коэффициентов, зависящие от угла свертки формул вычисления токов прямой и обратной последовательностей; i – текущий отсчет; N_0 – число точек, которое необходимо отступить для получения значения токов прямой и обратной последовательностей в зависимости от угла свертки.

Угол свертки – это значение комплексного множителя $e^{j\varphi}$, где φ принимает различные значения.

Эффективность функционирования ПО УБК, в частности чувствительность, определяется значением коэффициента небаланса K_{HEB} , под которым понимается величина, равная отношению величины небаланса токов на выходе фильтра к входному значению тока [4]:

$$K_{HEB} = \frac{I_{HEB}}{I_{AC}}, \quad (3)$$

где I_{HEB} – ток небаланса на выходе фильтра аварийных составляющих; I_{AC} – ток асинхронного режима на входе фильтра аварийных составляющих.

Чем меньше K_{HEB} , тем меньше ток небаланса I_{HEB} на выходе ФАС и, как следствие, эффективнее выделение аварийной составляющей из анализируемого сигнала.

Исследование эффективности алгоритма УБК. Анализ и исследование алгоритма УБК, построенного на использовании аварийных составляющих, проводились на математической модели, созданной в программе Mathcad 15 [5].

Разработанная математическая модель позволяет:

- задавать различные исходные данные для процесса моделирования (частоту дискретизации, период дискретизации, число отсчетов на период промышленной частоты, длительность анализируемых режимов);

- проводить анализ работы алгоритма в следующих режимах работы ЭЭС: нагрузочный режим, режим синхронных качаний с разной частотой скольжения; режим КЗ;

- учитывать текущую частоту. Это позволяет делать необходимое число выборок в сигнале при изменении частоты этого сигнала без особой потери информации. Определенному диапазону текущей частоты соответствует конкретное число точек на период.

В табл. 1 приведены значения коэффициентов K_1 , K_2 , K_3 и числа точек при значениях угла свертки φ , равных 120° , 60° , 30° , 15° .

Анализ полученных значений показал, что при значении угла $\varphi = 120^\circ$ и расчете аварийных составляющих по (1) и (2) имеет место запаздывание срабатывания ПО по приращению токов прямой и обратной последовательностей при подаче на каскад фильтров тока отдельно в фазу В или в фазу С, по сравнению с временем срабатывания ПО при подаче тока фазу А. Максимальное время запаздывания при подаче тока в фазу В составляет $2/3$ периода. Аналогичное время задержки получается при подаче тока в фазу С при расчете мгновенного значения тока обратной последовательности по (2).

Таблица 1

Значения угла φ	Значения коэффициентов			Значения числа точек N_0
	K_1	K_2	K_3	
120°	1	0	-1	$N_0 = \text{trunc}\left(\frac{N}{3}\right)$
60°	1	1	0	$N_0 = \text{trunc}\left(\frac{N}{6}\right)$
30°	$\sqrt{3}$	2	1	$N_0 = \text{trunc}\left(\frac{N}{12}\right)$
15°	$\frac{3+\sqrt{3}}{\sqrt{2}}$	$2+\sqrt{3}$	$1+\sqrt{3}$	$N_0 = \text{trunc}\left(\frac{N}{24}\right)$

Значения времени запаздывания срабатывания ПО в зависимости от угла φ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения угла	Значения числа точек N_0	Значения задержки срабатывания ПО, мс
120°	$N_0 = \text{trunc}\left(\frac{N}{3}\right)$	6,5
60°	$N_0 = \text{trunc}\left(\frac{N}{6}\right)$	3,25
30°	$N_0 = \text{trunc}\left(\frac{N}{12}\right)$	1,7
15°	$N_0 = \text{trunc}\left(\frac{N}{24}\right)$	0,83

Анализ полученных значений показывает, что при уменьшении угла φ запаздывание срабатывания ПО при подаче на каскад фильтров тока отдельно либо в фазу В, либо в фазу С, по сравнению с временем срабатывания ПО при подаче тока в фазу А, устраняется.

Определение коэффициента небаланса при качаниях в ЭЭС. В соответствии с функционально-логической схемой алгоритма (рис. 2), сформированные по (1) и (2) значения токов прямой и обратной последовательностей поступают на ФАС.

В ФАС для нахождения аварийных составляющих токов прямой и обратной последовательностей применялись следующие формулы:

$$\dot{i}_{1_{ABAP_i}} = \dot{i}_1 + 3 \cdot \dot{i}_{1_{i-\frac{N}{2}}} + 3 \cdot \dot{i}_{1_{i-N}} + \dot{i}_{1_{i-\frac{3N}{2}}}; \quad (3)$$

$$\dot{i}_{2_{ABAP_i}} = \dot{i}_2 + 3 \cdot \dot{i}_{2_{i-\frac{N}{2}}} + 3 \cdot \dot{i}_{2_{i-N}} + \dot{i}_{2_{i-\frac{3N}{2}}}, \quad (4)$$

где $\dot{i}_{1_{ABAP_i}}$, $\dot{i}_{2_{ABAP_i}}$ – аварийные составляющие токов прямой и обратной последовательностей соответственно; \dot{i}_1 , \dot{i}_2 – токи прямой и обратной последовательностей; $\dot{i}_{1_{ABAP_i}}$, i – текущий номер отсчета; N – число точек на период.

Режим качаний является симметричным режимом, поэтому появление тока обратной последовательности может быть связано со следующими причинами:

а) постоянное наличие тока обратной последовательности в системе, связанное с несимметричной нагрузкой по фазам;

б) небаланс на выходе ФАС, обусловленный погрешностями алгоритма.

Примем, что появление тока обратной последовательности обусловлено второй из указанных причин, т.е. погрешностями алгоритма ФАС. Рассмотрим поведение ФАС при изменении частоты скольжения от 1 до 10 Гц, контролируя значение небаланса на выходе ФАС для тока обратной последовательности, и оценим коэффициент небаланса данного фильтра в зависимости от частоты.

В целях упрощения определения коэффициента небаланса на вход каскада фильтров (рис. 2) будем подавать сигнал единичной амплитуды, тогда значение максимального сигнала (тока обратной последовательности) на выходе каскада будет являться искомым коэффициентом небаланса. Для уменьшения значения коэффициента небаланса применяется дополнительная фильтрация нерекурсивным фильтром:

$$Y_i = \sum_{n=0}^a (X_{i-n} \cdot L_n), \quad (5)$$

где X – входная величина; L – коэффициенты фильтра; a – длина фильтра; Y – выходная величина.

Результаты анализа работы каскада фильтров в исследуемых режимах представлены на рис. 3, где приведены зависимости коэффициентов небаланса от частоты скольжения. Дополнительная фильтрация реализована нерекурсивным фильтром, не изменяющим фазу сигнала:

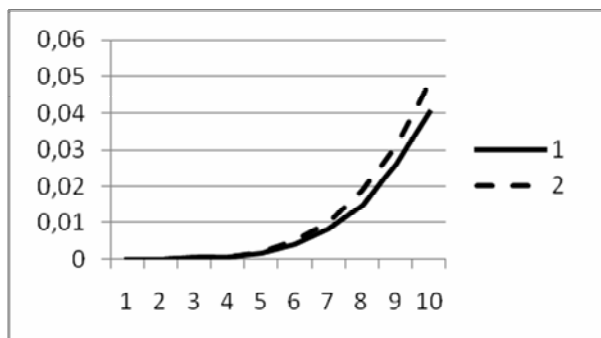


Рис. 3. Зависимость коэффициентов небаланса от частоты скольжения: 1 – коэффициент небаланса с дополнительной фильтрацией аварийной составляющей токов прямой и обратной последовательностей; 2 – коэффициент небаланса без дополнительной фильтрации аварийной составляющей токов прямой и обратной последовательностей

На основе математического моделирования получены значения коэффициента небаланса, которые могут использоваться для

отстройки ПО от устойчивых качаний в энергосистеме.

Заключение

Для выполнения блокировки при качаниях, реагирующей на возникновение в электроэнергетической системе при КЗ несимметрии и отсутствие несимметрии в режимах качаний, целесообразно применить алгоритм, основанный на последовательном выделении аварийных составляющих из токов прямой и обратной последовательностей с использованием каскада фильтров.

Анализ алгоритма УБК, основанного на использовании аварийных составляющих токов прямой и обратной последовательностей, на математической модели показал, что при значении угла свертки фильтра симметричных составляющих $\varphi = 120^\circ$ имеет место запаздывание срабатывания при подаче на каскад фильтров тока отдельно либо в фазу В, либо в фазу С, по сравнению с временем срабатывания при подаче тока в фазу А. Уменьшение угла свертки φ до $15\text{--}30^\circ$ устраняет указанный недостаток.

При использовании дополнительной фильтрации, основанной на нерекурсивном фильтре, обеспечивается уменьшение коэффициента небаланса по току обратной последовательности в режиме качаний и повышение чувствительности блокировки при качаниях.

Список литературы

1. ГОСТ 21027-75. Системы энергетические. Термины и определения. Введ. 1976-01-07. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 6 с.
2. Шнейерсон Э.М. Дистанционные защиты. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.
3. Циглер Г. Цифровая дистанционная защита: принципы и применение: пер. с англ. / под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Энергоиздат, 2005. – 322 с.
4. Чернобровов Н.В., Семёнов В.А. Релейная защита энергетических систем: учеб. пособие для техникумов. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.
5. ГОСТ 23875-88. Качество электрической энергии. Термины и определения. Введ. 1988-28-03. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 10 с.
6. Кирьянов Д.В. Mathcad 13. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 598 с.
7. Кокоулин Д.Н., Колесов Л.М., Шуин В.А. Анализ алгоритмов выделения аварийных составляющих в устройствах релейной защиты и автоматики // Электроэнергетика: мат-лы региональной науч.-техн. конф. студентов и аспирантов / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2010. – Т. 3. – С. 95–99.

References

1. GOST 21027-75. *Sistemy energeticheskie. Terminy i opredeleniya* [Power Engineering Systems. Terms and Definitions]. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1976. 6 p.
2. Shneerson, E.M. *Distantzionnye zashchity* [Distant Protections]. Moscow, Energoatomizdat, 1986. 448 p.
3. Tsigler, G. *Tsifrovaya distantzionnaya zashchita: printsipy i primeneniye* [Digital Distant Protection: Principles and Application]. Moscow, Energoizdat, 2005. 322 p.

4. Chernobrovov, N.V., Semenov, V.A. *Releynaya zashchita energeticheskikh sistem* [Relay Protection of Power Engineering Systems]. Moscow, Energoatomizdat, 1998. 800 p.

5. GOST 23875-88 *Kachestvo elektricheskoy energii. Terminy i opredeleniya* [Quality of Electrical Energy. Terms and Definitions]. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1988. 10 p.

6. Kir'yanov, D.V. *Mathcad 13*. Sankt-Peterburg, BKhV-Peterburg, 2006. 598 p.

7. Kokoulin, D.N., Kolesov, L.M., Shuin, V.A. Analiz al-

goritmov vydeleniya avariynykh sostavlyayushchikh v ustroystvakh releynoy zashchity i avtomatiki [Algorithms Analyses of Finding Safety Parts in Relay Protection and Automatics Devices]. *Elektroenergetika: Materialy regional'noy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov* [Power Engineering: Materials of Regional Scientific and Technical Conference among Students and Post Graduate Students]. Ivanovo, 2010, vol. 3, pp. 95–99.

Кокоулин Дмитрий Николаевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
телефон (4932) 269-904.

Шуин Владимир Александрович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
e-mail: shuin@rza.ispu.ru