

Novoselov Evgeny Mikhailovich,
Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of the Department of Electric Stations, Substations and Electrical Equipment Diagnostics, e-mail: captain.udgin@gmail.com

Полкошников Денис Андреевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры электрических систем, e-mail: pda37@yandex.ru
Polkoshnikov Denis Andreyevich,
Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of the Department of Electric Systems, e-mail: pda37@yandex.ru

Скоробогатов Андрей Александрович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, e-mail: aaskor.andrey@yandex.ru
Skorobogatov Andrei Aleksandrovich,
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Electric Stations, Substations and Electrical Equipment Diagnostics, e-mail: aaskor.andrey@yandex.ru

УДК 621.316.925

ВЫПОЛНЕНИЕ СТУПЕНИ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИИ О ТОКАХ ПИТАЮЩИХ КОНЦОВ ЛИНИИ С ОТВЕТВЛЕНИЕМ

Л.М. КОЛЕСОВ¹, В.В. МОЖЖУХИНА²,

¹ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация

²ООО «ВиВа Энерго», г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: mvv277@gmail.com

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время на линиях электропередачи 110–220 кВ для действия при междуфазных коротких замыканиях в зоне дальнего резервирования в большинстве случаев используется резервная ступень токовой или дистанционной защиты. Для линий с ответвлениями разработаны также защиты, основанные на применении специального высоковольтного оборудования; на использовании различных составляющих тока и их соотношениях; на базе виртуального реле сопротивления; на контроле аварийных и ортогональных составляющих токов с адаптивным торможением и коррекцией сигналов, а также с коррекцией характеристик срабатывания на основе данных об изменении напряжения и состояния коммутационных аппаратов питающей подстанции. Ряд разработок направлен на повышение чувствительности резервных защит ответвительных подстанций за счет изменения схемы включения, усовершенствования характеристик срабатывания и уточнения методики выбора уставок. Однако указанные защиты во многих случаях не обеспечивают требуемую чувствительность при коротких замыканиях на стороне низшего напряжения маломощного трансформатора ответвления линии. В связи с этим актуальной является задача разработки алгоритма действия резервной защиты, обеспечивающей требуемую чувствительность при коротких замыканиях на стороне низшего напряжения трансформатора ответвления.

Материалы и методы. Применены аналитические методы определения замера сопротивления измерительного органа дистанционной защиты и имитационное моделирование в среде пакетов Simulink и SimPowerSystems системы моделирования Matlab. Использована математическая модель линии с сосредоточенными параметрами. При выводе аналитических выражений сопротивления прямой и обратной последовательностей принимались одинаковыми.

Результаты. Получены аналитические выражения для определения замера сопротивления предлагаемой и существующей дистанционной защиты при междуфазных коротких замыканиях за трансформатором ответвления и в режиме нагрузки. Проведенные исследования показали, что предлагаемая дистанционная защита обладает требуемой чувствительностью при коротких замыканиях на стороне низшего напряжения трансформатора ответвления и необходимой отстройкой от нагрузочных режимов. Определены характеристика и методика выбора параметров срабатывания дополнительной ступени дистанционной защиты с использованием информации о токах питающих концов линии.

Выводы. Применение разработанного алгоритма функционирования дополнительной ступени дистанционной защиты, основанной на использовании суммы токов питающих концов линии, позволяет обеспечить требуемую чувствительность к междуфазным коротким замыканиям на стороне низшего напряжения трансформатора ответвления со схемой соединения «звезда-треугольник» и решить проблему дальнего резервирования защит ответвительных подстанций малой мощности. Достоверность полученных данных подтверждается соответствием результатов аналитического исследования и имитационного моделирования.

Ключевые слова: линия с ответвлением, дистанционная защита, дальнее резервирование, чувствительность, междуфазные короткие замыкания, трансформатор со схемой соединения «звезда-треугольник»

DESIGNING OF A DISTANCE PROTECTION STAGE BASED ON DATA ON BRANCHED LINE SUPPLY END CURRENTS

L.M. KOLESOV¹, V.V. MOZHZHUKHINA²

¹ Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

² ViVa Energo Ltd, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: mvv277@gmail.com

Abstract

Background. At present, in 110–220 kV transmission lines the problem of interphase short-circuits in the long-distance backup protection zone, in most cases, is solved by a backup level of current or distance protection. The existing protection solutions for lines with branching are based on the use of special high-voltage equipment, various current components and their ratios, a virtual resistance relay; on the control of emergency and orthogonal current components with adaptive braking and signal correction as well as with correction of the response characteristics according to the data on the voltage change and the state of the switching devices of the main substation. A number of developments are aimed at increasing the sensitivity of back-up protection of branch substations by changing the connection circuit, improving the response characteristics and refining the method for selecting the settings. However, these protection solutions in many cases do not provide the required sensitivity during short circuits on the low voltage side of a low-power branch transformer. All this means that an urgent problem to be solved is developing an algorithm for the operation of backup protection, providing the required sensitivity to short circuits on the low voltage side of the branch transformer.

Materials and methods. Analytical methods and simulation in the Simulink and SimPowerSystems packages of the Matlab modeling system were used to determine the impedance measurement of the distance protection measuring element. A mathematical model of the lumped-parameter line was used. When deriving analytical expressions, the impedances of the positive and negative sequences were assumed to be equal.

Results. Analytical expressions were obtained for determining the impedance measurement of the proposed and existing distance protection during phase-to-phase short-circuits appearing after a branch transformer and under load conditions. The studies have shown that the proposed distance protection has the required sensitivity to short circuits on the low voltage side of the branch transformer and the necessary detuning from load modes. The characteristics and methods for selecting response parameters of the additional stage of distance protection were determined using information on the currents of the line supply ends.

Conclusions. The use of an additional distance protection stage developed by the authors based on the sum of currents of the line supply ends can ensure the required sensitivity to phase-to-phase short circuits on the low voltage side of the branch transformer with a star-delta connection circuit and solve the problem of distant backup protection of low power branch substations. The reliability of the data obtained is confirmed by the correspondence of the results of the analytical research and simulation modeling.

Key words: line with branching, distance protection, distant backup protection, sensitivity, phase-to-phase short circuits, star-delta connection transformer

DOI: 10.17588/2072-2672.2019.4.044-053

Введение. В настоящее время на ЛЭП 110–220 кВ для действия при междуфазных коротких замыканиях (КЗ) на стороне низшего напряжения (НН) трансформатора ответвления в большинстве случаев используется резервная ступень

токовой или дистанционной защиты (ДЗ) [1], подключаемая к измерительным трансформаторам тока (ТТ) и напряжения (ТН) одного из концов линии. При этом возникают значительные трудности в обеспечении требуемой чувствительности

к КЗ за трансформатором ответвления. Это определяется в первую очередь влиянием подпитки с противоположной стороны линии, при которой значение замера сопротивления может быть значительно больше действительного сопротивления до места КЗ. Во-вторых, реле сопротивления (РС) должно быть отстроено от нагрузочного режима линии, причем переток мощности по линии может быть таким, что ток нагрузки соизмерим с током КЗ за трансформатором ответвления, а сопротивление нагрузочного режима близко к замеру сопротивления при КЗ за трансформатором. Наиболее существенные проблемы с обеспечением требуемой чувствительности возникают при двухфазных КЗ за трансформатором со схемой соединения обмоток «звезда – треугольник»¹.

Решению проблемы дальнего резервирования (ДР) защит ответвительных подстанций уделяется серьезное внимание в работах отечественных исследователей. Актуальность данного вопроса подтверждается наличием и постоянным появлением новых публикаций, патентов и авторских свидетельств по данной тематике.

Ряд разработок в области дальнего резервирования ответвительных подстанций основан на применении специального высоковольтного оборудования (трехсекционных реакторов с управляемой вторичной обмоткой, силовых трансформаторов с подмагничивающей обмоткой и т.д.), изменяющего режим работы сети при возникновении выявляемых повреждений. Необходимость значительных капиталовложений ограничила их применение [2].

В связи с этим были разработаны защиты, не требующие установки специального высоковольтного оборудования и базирующиеся на использовании различных составляющих тока и их соотношениях. Так, были предложены защита с контролем тока обратной последовательности [2], с контролем разности модулей токов фаз и их приращения [3].

Существенное внимание вопросам дальнего резервирования защит ответвительных подстанций уделяется в Южно-Российском государственном техническом университете (Новочеркасский политехнический институт) ЮРГПУ (НПИ). На основе

многолетнего опыта в последнее время были разработаны: многопараметрическая микропроцессорная защита (КЕДР-07М), контролирующая аварийные и ортогональные составляющие токов с адаптивным торможением и коррекцией сигналов [4]; многопараметрическая защита дальнего резервирования ответвительных подстанций (МСРЗ-01ДР) с коррекцией характеристик срабатывания на основе данных об изменении напряжения и состояния коммутационных аппаратов питающей подстанции, текущих величин и приращений ортогональных составляющих тока прямой последовательности контролируемой ВЛ [5]. В [6] подтверждается невозможность разделения аварийных и допустимых режимов для линий с ответвлениями на основе использования традиционных алгоритмов (модули, аргументы токов и сопротивлений), при этом для обеспечения необходимой чувствительности к КЗ за маломощными трансформаторами ответвительных подстанций отмечается необходимость обмена информацией между подстанциями транзитных ВЛ.

В Чувашском государственном университете имени И.Н. Ульянова (ЧГУ) разрабатываются защиты, принцип действия которых основан на использовании алгоритмических моделей объекта (АМО). На основе данных о предаварийном режиме и приращениях текущего режима в месте установки защиты АМО определяет токи и напряжения в ветви предполагаемого повреждения (за трансформатором ответвления) – в месте установки виртуального реле сопротивления (ВРС). Данный принцип получил применение в современном микропроцессорном терминале защиты Бреслер-0107.03 [7].

Ряд разработок направлен на повышение чувствительности традиционных ДЗ за счет изменения схемы включения РС, усовершенствования характеристик срабатывания и уточнения методики выбора уставок. Так, в [8, 9] для обеспечения ДР при КЗ на стороне НН трансформаторов ответвления рекомендуется включать РС на фазный ток и фазное напряжение одноименных фаз.

Еще одним направлением решения вопроса дальнего резервирования защит ответвительных подстанций является использование канала связи между питающими концами линии. Известна резервная

¹ Руководящие указания по релейной защите. Вып. 7. Дистанционная защита линий 35–330 кВ. – М.: Энергия, 1966. – 172 с.

защита с использованием высокочастотного канала основной дифференциально-фазной защиты линии, а также резервная защита ВЛ с использованием высокочастотной блокировки основной защиты [2].

В микропроцессорных терминалах фирмы «Радиус-автоматика» для действия при КЗ на стороне НН трансформаторов ответвлений применяется специальная резервная ступень продольной дифференциальной токовой защиты (ДЗЛ) линии. При КЗ на ответвлении ДЗЛ функционирует как максимальная токовая защита (МТЗ), включенная на сумму токов двух питающих концов линии [10]. В этой защите при выборе тока срабатывания необходимо обеспечить отстройку от тока самозапуска суммарной нагрузки всех ответвлений, поэтому обеспечение требуемой чувствительности данной ступени при наличии на линии нескольких ответвлений затруднительно.

Современный этап развития электроэнергетики характеризуется активным внедрением систем связи и передачи данных, созданием цифровых подстанций, что обуславливает достаточную доступность информации о токах нескольких концов линий для целей релейной защиты. Сравнение преимуществ и недостатков различных видов резервных защит линий с ответвлениями позволяет сделать вывод о целесообразности развития дистанционного принципа на основе использования канала связи между питающими подстанциями.

С учетом сказанного разработан алгоритм функционирования ДЗ с использованием волоконно-оптического канала

связи (ВОЛС), который обеспечивает повышение чувствительности защиты к коротким замыканиям на стороне НН трансформатора ответвления [11]. Орган сопротивления дополнительной ступени ДЗ выполняется на базе виртуального РС, включаемого на сумму токов двух питающих концов линии и напряжение в месте ответвления. Для получения напряжения в месте ответвления используется напряжение на шинах, компенсированное падением напряжения от тока на сопротивлении участка линии до ответвления.

Для защиты ДЗ₁ по схеме рис. 1 замер измерительного органа сопротивления (ИОС) определяется выражением [12]

$$Z_{\text{зам}} = \frac{\dot{U}_1 - i_1 Z_{\text{Л1}}}{i_1 + i_2}, \quad (1)$$

где \dot{U}_1 – напряжение на шинах подстанции в месте установки защиты; $Z_{\text{Л1}}$ – сопротивление участка линии до ответвления; i_1 и i_2 – ток через защиту и ток противоположного конца линии.

Предлагаемый ИОС включается на фазные величины, что позволяет обеспечить равенство замеров сопротивления при двухфазных и трехфазных КЗ на стороне НН трансформатора ответвления Y/Δ-11.

В качестве объекта исследования выбрана ЛЭП 110–220 кВ с ответвлением при наличии двустороннего питания, в качестве предмета исследования – резервные ступени традиционной и предлагаемой ДЗ.

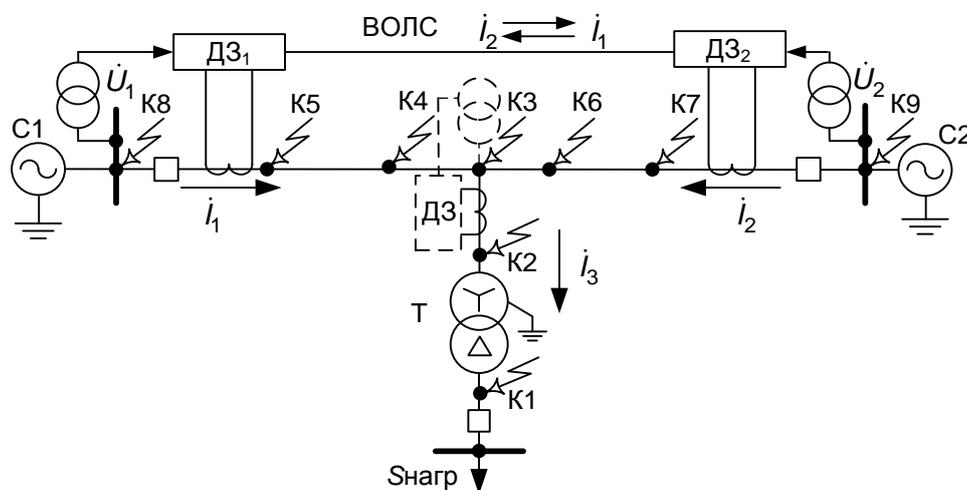


Рис. 1. Схема ИОС, включаемого на сумму токов двух питающих концов линии и напряжение в месте ответвления

Целью исследований является сравнительный анализ возможности выявления междуфазных КЗ на стороне НН трансформатора ответвления существующей и предлагаемой ДЗ, а также определение характеристики срабатывания предлагаемой защиты.

Материалы и методы. Для решения поставленных задач использованы аналитические методы определения замера сопротивления ИО ДЗ и имитационное моделирование в среде пакетов Simulink и SimPowerSystems системы моделирования Matlab.

Для анализа возможностей защит получены аналитические выражения для определения замера сопротивления предлагаемой и существующей ДЗ при междуфазных КЗ за трансформатором ответвления и в режиме нагрузки. Эти выражения позволяют учитывать влияние таких факторов, как трансформация Y/Δ , соотношение мощностей, модулей и фаз эквивалентных ЭДС питающих систем, соотношение сопротивлений участков линии, мощность трансформатора ответвления, величина нагрузки ответвления, переходное сопротивление в месте КЗ и др.

При выводе аналитических выражений сопротивления прямой и обратной последовательностей принимались одинаковыми. Токи, напряжения и переходное сопротивление в месте КЗ приводились к стороне ВН. Коэффициенты трансформации измерительных ТТ и ТН для упрощения не учитывались, так как при рассмотрении линейных режимов они влияют лишь на масштабы получаемых характеристик.

По полученным аналитическим выражениям в среде Mathcad составлена программа расчета замера сопротивления предлагаемой и существующей защиты, учитывающая указанные выше факторы, при КЗ на стороне НН трансформатора ответвления и в режиме нагрузки.

Для проверки полученных результатов с использованием программного комплекса Matlab были разработаны математические модели рассматриваемого участка сети, математические модели предлагаемого и традиционного ИО сопротивления, а также комплексные математические модели системы «объект-устройство».

Рассмотрены случаи установки на защищаемом ответвлении трансформаторов мощностью от 2,5 до 80 МВА при

мощности нагрузки ответвления от 0 до 1,4 Стном.

Исследования проведены при изменении угла сдвига фаз ЭДС второй системы по отношению к первой в пределах $-60^\circ \div 60^\circ$, при изменении отношения модулей ЭДС второй системы к первой в пределах $0,9 \div 1,1$, при изменении отношения мощностей систем С1 и С2 в пределах $0,25 \div 4,0$, при изменении переходного сопротивления в месте КЗ на стороне НН в пределах $0 \div 0,5$ номинального сопротивления защищаемого трансформатора, при изменении коэффициента трансформации за счет учета РПН.

При анализе учитывались изменения соотношения модулей и угла сдвига фаз ЭДС питающих систем только в пределах, обеспечивающих протекание токов в ЛЭП, не превышающих длительно допустимых значений.

Сходимость результатов аналитического решения и результатов, полученных на имитационных моделях, подтверждает достоверность полученных выражений.

Определение замера сопротивления предлагаемой ДЗ линии с ответвлением. Для исследования влияния указанных выше факторов на эффективность функционирования предлагаемой ДЗ были получены аналитические выражения для определения замера сопротивления при КЗ в характерных точках (рис. 1).

При трехфазных КЗ за трансформатором ответвления (К1) с соединением обмоток $Y/\Delta-11$ замер сопротивления предлагаемой ДЗ определяется по выражению

$$Z_{\text{зам}}^{(3)} = Z_{\text{отв}} + Z_{\text{тр}} + r_{\text{пер}}, \quad (2)$$

где $Z_{\text{отв}}$ – сопротивление ответвления; $Z_{\text{тр}}$ – сопротивление трансформатора ответвления; $r_{\text{пер}}$ – переходное сопротивление электрической дуги.

В случае двухфазных КЗ за трансформатором ответвления (К1) замер одного из реле предлагаемой ДЗ будет таким же, как и при трехфазных КЗ:

$$Z_{\text{зам}}^{(2)} = Z_{\text{отв}} + Z_{\text{тр}} + r_{\text{пер}}. \quad (3)$$

При КЗ на стороне высшего напряжения трансформатора ответвления (К2) сопротивление на зажимах защиты будет равно

$$Z_{\text{зам}} = Z_{\text{отв}} + r_{\text{пер}}. \quad (4)$$

В случае металлического КЗ в месте ответвления (К3) замер сопротивления равен нулю.

При металлическом КЗ на линии до ответвления (К4) замер сопротивления располагается в третьем квадранте плоскости Z и равен

$$Z_{\text{зам}} = (Z_{\text{кзл1}} - Z_{\text{л1}}) \frac{i_1}{i_1 + i_2}, \quad (5)$$

где $Z_{\text{кзл1}}$ – сопротивление от места установки защиты до места КЗ.

При КЗ в начале линии (К5) замер сопротивления располагается в третьем квадранте плоскости Z и равен

$$Z_{\text{зам}} = -Z_{\text{л1}} \frac{i_1}{i_1 + i_2}. \quad (6)$$

В случае КЗ на линии после ответвления (К6) замер сопротивления располагается в первом квадранте плоскости Z и равен

$$Z_{\text{зам}} = Z_{\text{кзл2}} \frac{i_1}{i_1 + i_2}, \quad (7)$$

где $Z_{\text{кзл2}}$ – сопротивление от места ответвления до места КЗ.

При КЗ в конце линии (К7) замер сопротивления располагается в первом квадранте плоскости Z и равен

$$Z_{\text{зам}} = Z_{\text{л2}} \frac{i_1}{i_1 + i_2}. \quad (8)$$

В случае внешнего КЗ «за спиной» (К8) замер сопротивления равен

$$Z_{\text{зам}} = (Z_{\text{кзс1}} - Z_{\text{л1}}) \frac{i_1}{i_{\text{нагр.отв}}}, \quad (9)$$

где $Z_{\text{кзс1}}$ – сопротивление от места установки защиты до места КЗ в системе С1; $i_{\text{нагр.отв}}$ – ток нагрузки ответвления.

При внешнем КЗ за защищаемой линией (К9) замер сопротивления равен

$$Z_{\text{зам}} = (Z_{\text{кзс2}} + Z_{\text{л2}}) \frac{i_1}{i_{\text{нагр.отв}}}, \quad (10)$$

где $Z_{\text{кзс2}}$ – сопротивление от конца линии до места КЗ в системе С2.

В нагрузочном режиме сумма токов по концам защищаемой линии равна току нагрузки ответвления, поэтому замер со-

противления оказывается равным сопротивлению нагрузки ответвления.

Определение замера сопротивления традиционной ДЗ линии с ответвлением. Традиционно ДЗ предназначена для действия при междуфазных КЗ и подключается на междуфазное напряжение и соответствующую разность фазных токов. Таким образом замер сопротивления ИО ДЗ определяется известным выражением [1]:

$$Z_{\text{мф}} = \frac{U_{\text{мф}}}{i_{\text{ф1}} - i_{\text{ф2}}}. \quad (11)$$

В симметричных режимах (при трехфазном КЗ $K^{(3)}$ за трансформатором ответвления и в режиме нагрузки) замер сопротивления традиционной ДЗ для трех реле определяется выражением

$$Z_{\text{мф}} = Z_{\text{л1}} + Z_3 \times \frac{\dot{E}_{\text{C1}}(Z_{\text{C2}} + Z_{\text{л2}}) + \dot{E}_{\text{C2}}(Z_{\text{C1}} + Z_{\text{л1}})}{\dot{E}_{\text{C1}}(Z_{\text{C2}} + Z_{\text{л2}} + Z_3) - \dot{E}_{\text{C2}} Z_3}, \quad (12)$$

где $Z_3 = Z_{\text{отв}} + Z_{\text{тр}} + r_{\text{пер}}$ – сопротивление поврежденного ответвления для КЗ $K^{(3)}$ или $Z_3 = Z_{\text{отв}} + Z_{\text{тр}} + Z_{\text{нагр.отв}}$ – в нагрузочном режиме.

При двухфазном КЗ на стороне НН трансформатора ответвления выражение для определения замера ИОС несколько усложняется из-за искажения измеряемых токов и напряжений при переходе через трансформатор со схемой соединения $Y/\Delta-11$.

При двухфазном коротком замыкании $K_{\text{CA}}^{(2)}$ между фазами С и А за трансформатором ответвления замер сопротивления ДЗ линии для трех реле определяется следующими выражениями:

$$Z_{\text{AB}} = Z_{\text{л1}} \frac{\sqrt{3} \dot{E}_{1A} e^{j30^\circ}}{\sqrt{3} E_{1A} e^{j30^\circ} - \dot{E}_{\text{C3A}} \left(\sqrt{3} e^{j30^\circ} - \frac{3}{2} \frac{Z_{\text{C3}}}{(Z_{\text{C3}} + Z_3)} \right)} + Z_{\text{C1}} \frac{\dot{E}_{\text{C3A}} \left(\sqrt{3} e^{j30^\circ} - \frac{3}{2} \frac{Z_{\text{C3}}}{(Z_{\text{C3}} + Z_3)} \right)}{\sqrt{3} \dot{E}_{1A} e^{j30^\circ} - \dot{E}_{\text{C3A}} \left(\sqrt{3} e^{j30^\circ} - \frac{3}{2} \frac{Z_{\text{C3}}}{(Z_{\text{C3}} + Z_3)} \right)}; \quad (13)$$

$$Z_{\text{BC}} = Z_{\text{л1}} \frac{\dot{E}_{1A}}{\dot{E}_{1A} - \dot{E}_{\text{C3A}}} + Z_{\text{C1}} \frac{\dot{E}_{\text{C3A}}}{\dot{E}_{1A} - \dot{E}_{\text{C3A}}}; \quad (14)$$

$$\underline{Z}_{CA} = \underline{Z}_{Л1} \frac{\sqrt{3} \dot{E}_{1A} e^{j150^0}}{\sqrt{3} \dot{E}_{1A} e^{j150^0} - \dot{E}_{C3A} \left(\sqrt{3} e^{j150^0} + \frac{3}{2} \frac{\underline{Z}_{C3}}{(\underline{Z}_{C3} + \underline{Z}_3)} \right)} + \underline{Z}_{C1} \frac{\dot{E}_{C3A} \left(\sqrt{3} e^{j150^0} + \frac{3}{2} \frac{\underline{Z}_{C3}}{(\underline{Z}_{C3} + \underline{Z}_3)} \right)}{\sqrt{3} \dot{E}_{1A} e^{j150^0} - \dot{E}_{C3A} \left(\sqrt{3} e^{j150^0} + \frac{3}{2} \frac{\underline{Z}_{C3}}{(\underline{Z}_{C3} + \underline{Z}_3)} \right)}, \quad (15)$$

где \dot{E}_{C3A} , \underline{Z}_{C3} – ЭДС и сопротивление эквивалентной системы:

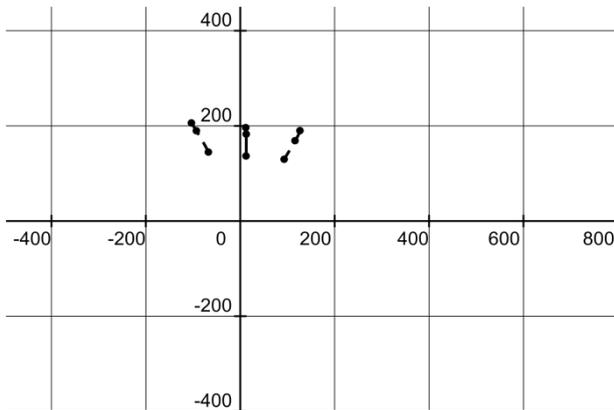
$$\dot{E}_{C3A} = \frac{\dot{E}_{C1}(\underline{Z}_{C2} + \underline{Z}_{Л2}) + \dot{E}_{C2}(\underline{Z}_{C1} + \underline{Z}_{Л1})}{\underline{Z}_{C1} + \underline{Z}_{Л1} + \underline{Z}_{Л2} + \underline{Z}_{C2}}; \quad (16)$$

$$\underline{Z}_{C3} = \frac{(\underline{Z}_{C1} + \underline{Z}_{Л1})(\underline{Z}_{C2} + \underline{Z}_{Л2})}{\underline{Z}_{C1} + \underline{Z}_{Л1} + \underline{Z}_{Л2} + \underline{Z}_{C2}}; \quad (17)$$

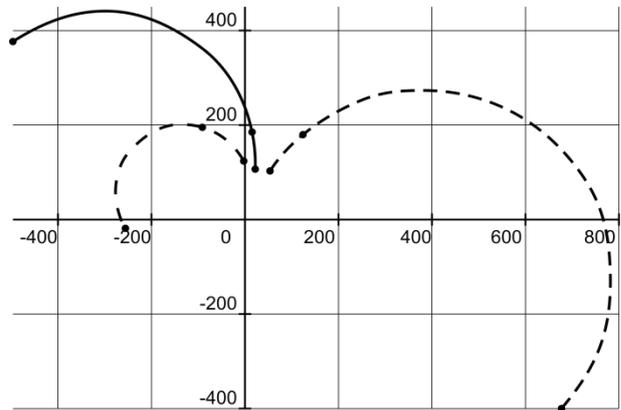
\underline{Z}_3 – сопротивление поврежденного ответвления, аналогичное случаю КЗ $K^{(3)}$.

Аналогичные выражения для определения замера сопротивления трех ИО ДЗ получаются при замыканиях между фазами АВ и ВС, если рассматривать, что в данном случае \underline{Z}_{CA} – замер сопротивления в поврежденном контуре, \underline{Z}_{AB} – замер сопротивления опережающего контура, \underline{Z}_{BC} – отстающего контура.

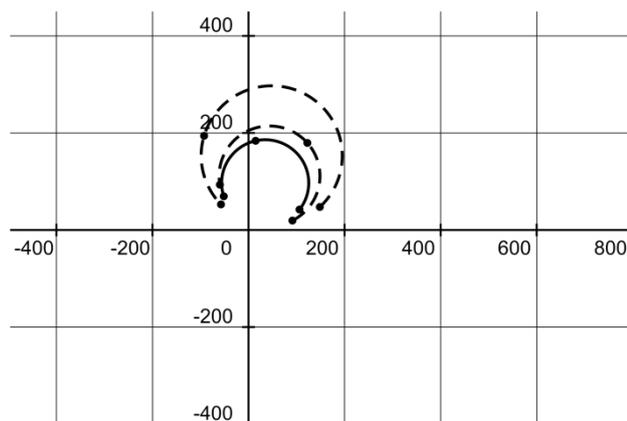
Результаты исследования. Анализ показал, что указанные выше факторы оказывают существенное влияние на замер сопротивления традиционной ДЗ и мало влияют на замер предлагаемой ДЗ. В качестве примера на рис. 2 приведены годографы замера сопротивления традиционной ДЗ в случае междуфазных КЗ на стороне НН трансформатора мощностью 16 МВА.



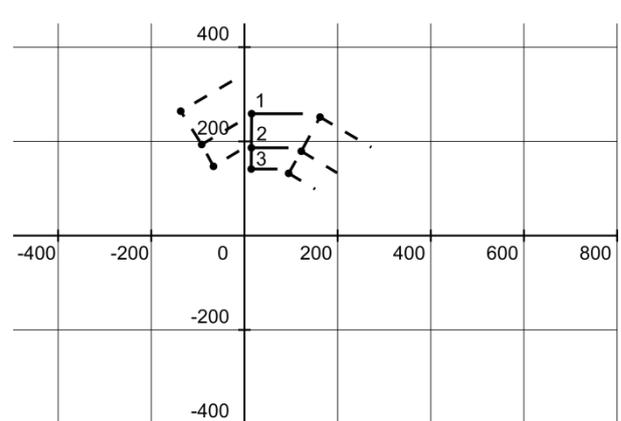
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Годограф замера сопротивления традиционной ДЗ при междуфазных КЗ на стороне НН трансформатора ответвления при изменении параметров сети для основных фаз повреждения: сплошная линия – при $K^{(3)}$; штриховая линия – при $K^{(2)}$

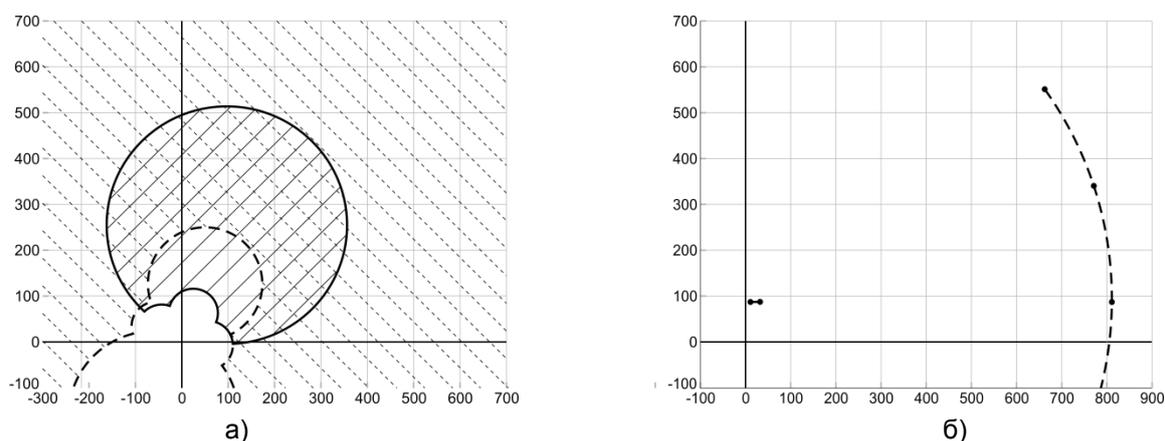


Рис. 3. Замеры сопротивления существующей (область замеров – штриховка) (а); предлагаемой (изменение замера – линия) (б) ДЗ линии с ответвлением при КЗ на стороне НН трансформатора ответвления (сплошная линия) и в нагрузочном режиме (пунктирная линия) для случая изменения соотношения модулей и сдвига угла ЭДС питающих систем с учетом переходного сопротивления

При анализе учитывались следующие изменения: соотношения мощностей питающих систем (0,1 ... 10); соотношения модулей ЭДС (0,87 ... 1,15); сдвига угла ЭДС (-15° до 15°); переходного сопротивления в месте повреждения (0 ... 0,45 $Z_{тр}$) с учетом положения РПН (1 – максимальное; 2 – среднее; 3 – минимальное).

Также для примера на рис. 3,а,б приведены области замеров сопротивлений для существующей и предлагаемой ДЗ при одновременном изменении соотношения модулей и сдвига угла ЭДС питающих систем с учетом переходного сопротивления при КЗ на стороне НН трансформатора ответвления мощностью 16 МВА и в нагрузочном режиме (для предлагаемого ИО также изменялся $\operatorname{tg}(\varphi)$ нагрузки).

Результаты исследований показали, что традиционные реле сопротивления во многих случаях не могут отличить нагрузочный режим от режима КЗ на стороне НН трансформатора ответвления (о чем свидетельствует перекрытие области междуфазных КЗ и режима нагрузки на рис. 3,а).

В то же время предлагаемое дополнительное РС однозначно выявляет указанные режимы и имеет возможность обеспечить требуемую чувствительность при КЗ и необходимую отстройку от нагрузочного режима (о чем свидетельствует расхождение замеров сопротивлений на рис. 3,б).

Для предлагаемой ДЗ также проведено моделирование режимов КЗ на линии с ответвлением и на смежных линиях. Результаты показали, что в нагрузочных режимах и при внешних КЗ замеры сопротивления оказываются значительно больше замеров при КЗ на стороне НН. А от КЗ

на питающей линии можно отстроиться выбором характеристики срабатывания предлагаемого устройства.

В качестве характеристики срабатывания предлагается использовать прямоугольник, с запасом охватывающий замеры сопротивления при КЗ на стороне НН трансформатора ответвления. Для определения характеристики срабатывания предлагаемого ИОС, представленной на рис. 4, необходимо задать две уставки по активному и две уставки по реактивному сопротивлению. Уставки предлагаемого ИОС зависят только от сопротивления защищаемого трансформатора и сопротивления нагрузки этого трансформатора. Причем сопротивление трансформатора ответвления должно рассчитываться с учетом РПН. Расчетные выражения для определения параметров срабатывания предлагаемой ДЗ приведены в таблице.

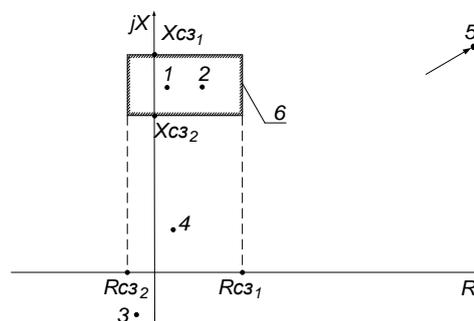


Рис. 4. Характеристика срабатывания предлагаемого ИО ДЗ и замеры сопротивления: 1 – при металлических 3-х фазных и 2-х фазных КЗ за трансформатором ответвления (К1 по рис. 1); 2 – при КЗ в К1 через переходное сопротивление; 3 – при КЗ в начале линии (К5); 4 – при КЗ в конце линии (К7); 5 – при внешних КЗ (К8, К9) и в нагрузочном режиме работы; 6 – характеристика срабатывания предлагаемого ИО ДЗ

Расчетные выражения для определения параметров срабатывания предлагаемой ДЗ

Параметр	Расчетное выражение	Примечание
Уставки по оси реактивных сопротивлений $X_{сз1}, X_{сз2}$	$X_{сз1} \geq K_{\text{доп}} X_{\text{тр.макс}};$ $X_{сз2} \geq \frac{X_{\text{тр.мин}}}{K_{\text{доп}}}$	$X_{\text{тр.макс}}, X_{\text{тр.мин}}$ – реактивное сопротивление трансформатора ответвления для крайних положений РПН; $R_{\text{тр}}$ – активное сопротивление трансформатора ответвления;
Уставки по оси активных сопротивлений $R_{сз1}, R_{сз2}$	$R_{сз1} \geq K_{\text{доп}} (R_{\text{тр}} + r_{\text{пер}});$ $R_{сз1} < K_{\text{отс}} R_{\text{н.мин}};$ $R_{сз2} < K_{\text{доп}} (R_{\text{тр}} - r_{\text{пер}})$	$R_{\text{н.мин}}$ – минимальное сопротивление нагрузки ответвления; $K_{\text{доп}}$ – минимально допустимый коэффициент чувствительности резервной ступени; $K_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки от нагрузочного режима

Выводы. Проведенные исследования показали, что предлагаемая ДЗ обладает более высокой чувствительностью к КЗ на стороне НН трансформатора ответвления и лучшей отстройкой от нагрузочных режимов, чем существующие защиты.

Испытания на математических моделях показали возможность выполнения предложенного принципа ДЗ и эффективность распознавания им режимов внутренних КЗ, внешних КЗ и режимов без КЗ на линии с ответвлением при наличии двухстороннего питания.

Список литературы

1. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 520 с.
2. Кузник Ю.С. Возможности дальнейшего резервирования защит трансформаторов // Электрические станции. – 1994. – № 10. – С. 49–53.
3. Клецель М.Я., Никитин К.И. Резервная защита линий, реагирующая на разность модулей токов фаз и их приращения // Электричество. – 1993. – № 10. – С. 23–26.
4. Нагай И.В. Формирование характеристик срабатывания резервных защит воздушных линий с ответвлениями // Изв. вузов. Электромеханика. – 2011. – № 2. – С. 56–61.
5. Киреев П.С., Петрова О.В. Адаптивный измерительный орган приращения тока прямой последовательности защит дальнего резервирования радиальных линий // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. V Междунар. науч.-техн. конф. Т. 1. – Томск, 2014. – С. 513–517.
6. Особенности функционирования релейной защиты воздушных линий с ответвлениями / И.В. Нагай, В.И. Нагай, А.В. Украинцев и др. // Релейная защита и автоматика энерго-

систем: Междунар. конф. – М., 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.rza-expo.ru/doc/rza_materialy3.pdf

7. Павлов А.О., Васильев Д.С. Высокочувствительная защита дальнего резервирования линий электропередачи // Энергетик. – 2008. – № 12. – С. 5–7.

8. Лупа В.И. Дальнее резервирование при повреждениях трансформаторов // Электрические станции. – 1989. – № 4. – С. 67–68.

9. Опыт эксплуатации защит дальнего резервирования тупиковых линий в сетевой кампании Татарстана / Р.М. Баязитов, В.М. Лопухов, В.М. Меер и др. // Релейная защита и автоматизация. – 2016. – № 01(22). – С. 50–58.

10. Микропроцессорное устройство защиты «Сириус-2-ДЗЛ-01». Руководство по эксплуатации. – М.: ЗАО «РАДИУС Автоматика», 2012. – М.: ЗАО «РАДИУС Автоматика» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.rza.ru/upload/iblock/475/sirius_2_dzl_01.pdf

11. Патент 2573595 Российская Федерация МПК H02H3/40, G01R 31/08. Устройство для дистанционной защиты линии электропередачи с ответвлением / Л.М. Колесов, В.В. Можжухина; опубл. 20.01.2016, Бюл. № 2.

12. Колесов Л.М., Можжухина В.В. Повышение чувствительности дистанционных защит линий с ответвлениями и автотрансформаторов к коротким замыканиям на стороне низшего напряжения // Релейная защита и автоматика энергосистем: тез. докл. XXII Междунар. науч.-практ. конф. – М., 2014. – С. 123–127.

References

1. Fedoseev, A.M. *Releynaya zashchita elektricheskikh system* [Relay protection of electrical systems]. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 520 p.
2. Kuznik, Yu.S. *Vozmozhnosti dal'neyshego rezervirovaniya zashchit transformatorov* [Possibilities for additional backup protection of transformers]. *Elektricheskie stantsii*, 1994, no. 10, pp. 49–53.

3. Kletsel', M.Ya., Nikitin, K.I. Rezervnaya zashchita liniy, reagiruyushchaya na raznost' moduley tokov faz i ikh prirashcheniya [Backup line protection reacting to the difference between the modules of phase currents and their increments]. *Elektrichestvo*, 1993, no. 10, pp. 23–26.

4. Nagay, I.V. Formirovanie kharakteristik sbratyvaniya rezervnykh zashchit vozdukhnykh liniy s otvetvleniyami [Response characteristics formation of branched overhead line backup protection]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2011, no. 2, pp. 56–61.

5. Kireev, P.S., Petrova, O.V. Adaptivnyy izmeritel'nyy organ prirashcheniya toka pryamoy posledovatel'nosti zashchit dal'nego rezervirovaniya radial'nykh liniy [Adaptive measuring unit of current increment of radial line direct sequence long-range backup protection]. *Sbornik nauchnykh trudov V Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektroenergetika glazami molodezhi»* [Collected scientific works of the V International scientific and technical conference «Electrical Power Engineering Through the Youth's Eyes»]. Tomsk, 2014, vol. 1, pp. 513–517.

6. Nagay, I.V., Nagay, V.I., Ukraintsev, A.V., Sarry, S.V., Kireev, P.S. Osobennosti funktsionirovaniya releyroy zashchity vozdukhnykh liniy s otvetvleniyami [Operation of branched overhead line relay protection]. *Mezhdunarodnaya konferentsiya «Releynaya zashchita i avtomatika energosistem»* [International conference «Relay protection and automation of power systems»]. Moscow, 2017. Available at: https://www.rza-expo.ru/doc/rza_materialy3.pdf

7. Pavlov, A.O., Vasil'ev, D.S. Vysokochuvstvitel'naya zashchita dal'nego rezervirovaniya liniy elektroperedachi [Highly sensitive distant

backup protection of power lines]. *Energetik*, 2008, no. 12, pp. 5–7.

8. Lupa, V.I. Dal'nee rezervirovanie pri povrezhdeniyakh transformatorov [Transformer fault distant backup protection]. *Elektricheskie stantsii*, 1989, no. 4, pp. 67–68.

9. Bayazitov, R.M., Lopukhov, V.M., Meer, V.M., Doni, N.A., Kochkin, N.A., Shurupov, A.A. Opyt ekspluatatsii zashchit dal'nego rezervirovaniya tupikovykh liniy v setevoy kompanii Tatarstana [Experience in operating distance protection for dead-end lines at the Tatarstan network company]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2016, no. 01(22), pp. 50–58.

10. Mikroprotsessornoe ustroystvo zashchity «Sirius-2-DZL-01». *Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Microprocessor protection device «Sirius-2-DZL-01». Manual]. Moscow: ZAO «RADIUS Avtomatika», 2012. Available at: https://www.rza.ru/upload/iblock/475/sirius_2_dzl_01.pdf

11. Kolesov, L.M., Mozhzhukhina, V.V. *Ustroystvo dlya distantsionnoy zashchity linii elektroperedachi s otvetvleniem* [Device for distance protection of power lines with branching]. Patent RF, no. 2573595, 2016.

12. Kolesov, L.M., Mozhzhukhina, V.V. Povysenie chuvstvitel'nosti distantsionnykh zashchit liniy s otvetvleniyami i avtotransformatorov k korotkim zamykaniyam na storone nizshego napryazheniya [Increasing the sensitivity of distance protection of branched lines and autotransformers to short circuits on the low voltage side]. *Tezisy dokladov XXII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Releynaya zashchita i avtomatika energosistem»* [Abstracts of the XXII International scientific and practical conference «Relay protection and automation of power systems»]. Moscow, 2014, pp.123–127.

Колесов Лев Михайлович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, телефон (4932) 26-99-06, e-mail: kolesovlm@yandex.ru

Kolesov Lev Mikhailovich,

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Electric Power Systems Automatic Control Department, tel.: (4932) 26-99-06, e-mail: kolesovlm@yandex.ru

Можжухина Виктория Владимировна,

ООО «ВиВа Энерго», магистр, инженер, телефон (4932) 26-99-06, e-mail: mvv277@gmail.com

Mozhzhukhina Viktoria Vladimirovna,

ViVa Energo Ltd, Holder of Master's degree, engineer, tel.: (4932) 26-99-06, e-mail: mvv277@gmail.com