
УДК 621.311:621.3.062.88

РАСПОЗНАВАНИЕ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ПОДВОДЯЩИХ ЦЕПЯХ С ЦЕЛЬЮ БЫСТРОГО АВАРИЙНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЗЕРВА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

© 2021 г. И. Д. Кочетов¹, Ю. Я. Лямец¹, Ф. А. Макашкин¹*, И. Е. Петряшин¹

¹ООО “Релематика”, Чувашский госуниверситет, Чебоксары, Россия

*e-mail: makashkin_fa@relematika.ru

Поступила в редакцию 19.01.2021 г.

После доработки 23.04.2021 г.

Принята к публикации 26.04.2021 г.

Рассматривается задача контроля состояния электрической сети, наблюдаемой со стороны нагрузок, а не источников, как это имеет место в традиционных задачах релейной защиты и автоматики. Затрагиваются информационные основы быстрого автоматического включения резерва (БАВР) питания потребителей. Показано, что характеру задачи отвечает метод разделения аварийных составляющих наблюдаемых токов на два компонента – нормальный и локальный. Задачу распознавания повреждения в цепи питания одной из двух нагрузок решает замер в виде отношения локальных токов. Зависимость замера от места повреждения инвариантна относительно переходного сопротивления в месте короткого замыкания (КЗ) и, что особенно важно, относительно нагрузок, которые переходят при КЗ в генераторный режим. Локальные токи определяются в комплексном базисе. Обработка наблюдаемых величин в реальном времени выполняется фильтром ортогональных составляющих. Влияние фильтров на быстродействие алгоритма смягчается благодаря конструкции положенного в его основу замера.

Ключевые слова: аварийное включение резерва, короткое замыкание, распознавание, быстродействие

DOI: 10.31857/S0002331021030080

Быстрое аварийное включение резерва электропитания востребовано производствами с непрерывным циклом работы [1], где на срабатывание терминала БАВР отводится время порядка периода частоты сети. По задаваемой скорости распознавания контролируемой ситуации автоматика БАВР не только не уступает релейной защите электрооборудования, но и по большей части превосходит ее. Напрашивается вывод, что алгоритмы распознавания, разработанные для целей релейной защиты, могут быть с успехом применены в автоматике БАВР. Принципиальное различие между условиями их применения можно усмотреть, пожалуй, только в одном. Релейная защита наблюдает энергообъект на шинах источников электроэнергии, а автоматика БАВР – на шинах потребителей. Но распознаванию подлежат одни и те же события – повреждения, прежде всего короткие замыкания в цепях передачи электроэнергии, идущих от источника к потребителю. Получается, что в автоматике БАВР могут быть применены те же унифицированные алгоритмы релейной защиты, которые инвариантны по отношению к месту наблюдения системы. Алгоритмы такого рода, обнаружившиеся в недавнее время, построены по принципу контроля всех мест предполагаемого повреждения [2–4]. Каждое место отображается на априорной характеристике

поврежденного объекта. В дальнейшем окажется так, что результаты наблюдения режима КЗ, произошедшего на реальном объекте в некотором месте, при сопоставлении с априорной характеристикой предоставят оценку координаты этого места.

Теоретические аспекты распознавания КЗ в сети при наблюдении ее нагрузок. Объединение информации о двух сменяющих один другого режимах – предшествующем режиме и следующим за ним режиме КЗ – создает эффект, имеющий теоретическое значение. Рассмотрим систему, включающую в свой состав три модуля A_1, A_2, A_3 , в общем случае активных (рис. 1). Подлежит контролю состояние модуля A_3 , имеющего соединения с двумя другими. Наблюдаются токи и напряжения в местах соединения.

Для простоты примем, что наблюдение ведется в базисе комплексных величин $\underline{I}_1, \underline{U}_1$ и $\underline{I}_2, \underline{U}_2$. Система полагается линейной. Еще предполагается, что величины предшествующего режима $\underline{I}_{\text{пд}}, \underline{U}_{\text{пд}}$ (рис. 1а) имеют экстраполяцию $\hat{\underline{I}}_{\text{пд}}, \hat{\underline{U}}_{\text{пд}}$ на время после КЗ, произошедшего в модуле A_3 (рис. 1б), в связи с чем текущий режим КЗ может быть представлен как наложение прежнего реального режима и искусственного чисто аварийного режима, в котором действуют аварийные составляющие токов и напряжений (рис. 1в) [5, 6]

$$\underline{I}_{\text{ав}} = \underline{I}_{\text{тк}} - \hat{\underline{I}}_{\text{пд}}, \quad \underline{U}_{\text{ав}} = \underline{U}_{\text{тк}} - \hat{\underline{U}}_{\text{пд}}. \quad (1)$$

Наличие источников в модуле A_3 подчеркнуто указанием ЭДС \underline{E} (рис. 1а–1в), а повреждение этого модуля отмечено появлением тока \underline{I}_f в месте КЗ (рис. 1б, 1в). Значения \underline{E} и \underline{I}_f , разумеется, неизвестны, как и место КЗ.

Зависимые от наблюдаемых режимов ЭДС $\underline{U}_{\text{пд}}$ и $\underline{U}_{\text{ав}}$ введены в структуру сети в соответствии с принципом компенсации. Состояние модуля A_3 в схеме по рис. 1в остается таким же, как и в исходной структуре по рис. 1б. Отличие лишь в том, что, начиная со схемы по рис. 1в, модули A_1 и A_2 могут быть исключены из рассмотрения. Далее в соответствии с принципом суперпозиции представляется возможным исключить из рассмотрения источник \underline{E} модуля A_3 и перейти к схеме чисто аварийного режима (рис. 1г), в которой теперь уже пассивный модуль Π_3 находится под воздействием внешних источников \underline{I}_f и $\underline{U}_{\text{ав}}$. Дальнейшее применение метода наложения приводит к разделению чисто аварийного режима на нормальный, создаваемый в неповрежденном модуле Π_3 аварийными составляющими напряжений $\underline{U}_{\text{ав}}$ (рис. 1д), и локальный режим, создаваемый в модуле Π_3 , выводы которого зашунтированы неизвестным током КЗ \underline{I}_f (рис. 1е). Локальный режим, бесспорно, играет центральную роль в распознавании КЗ, потому что именно здесь сконцентрирована информация о повреждении объекта. Нормальные компоненты и соответствующий нормальный режим играют подчиненную роль – они открывают путь к определению локальных компонентов

$$\underline{I}_{\text{ав,лк}} = \underline{I}_{\text{ав}} - \underline{I}_{\text{ав,нм}}, \quad \underline{U}_{\text{ав,лк}} = \underline{U}_{\text{ав}} - \underline{U}_{\text{ав,нм}}, \quad (2)$$

но сами по себе не имеют непосредственной связи с повреждением.

Распознавание КЗ в сети при наблюдении ее нагрузок. Рассмотрим алгоритм решения стоящей задачи на примере сети по рис. 2а. Нагрузки N_1 и N_2 питаются от разных трансформаторов T_1 и T_1 , которые получают энергию от одного источника с ЭДС \underline{E} и внутренним сопротивлением $\underline{Z}_{\text{и}}$ по линиям электропередачи L_1 и L_2 длиной l_1 и l_2 с удельными сопротивлениями \underline{Z}_1^0 и \underline{Z}_2^0 . Наблюдаются токи и напряжения нагрузок в предшествующем и текущем режимах $\underline{I}_{\text{пд}}, \underline{U}_{\text{пд}}; \underline{I}_{2\text{пд}}, \underline{U}_{2\text{пд}}; \underline{I}_{\text{тк}}, \underline{U}_{\text{тк}}; \underline{I}_{2\text{тк}}, \underline{U}_{2\text{тк}}$; по ним определяются как разности (1) аварийные составляющие $\underline{I}_{\text{ав}}, \underline{U}_{\text{ав}}; \underline{I}_{2\text{ав}}, \underline{U}_{2\text{ав}}$. Задача распознавания заключается в раздельной реакции на КЗ в первой и во второй подво-

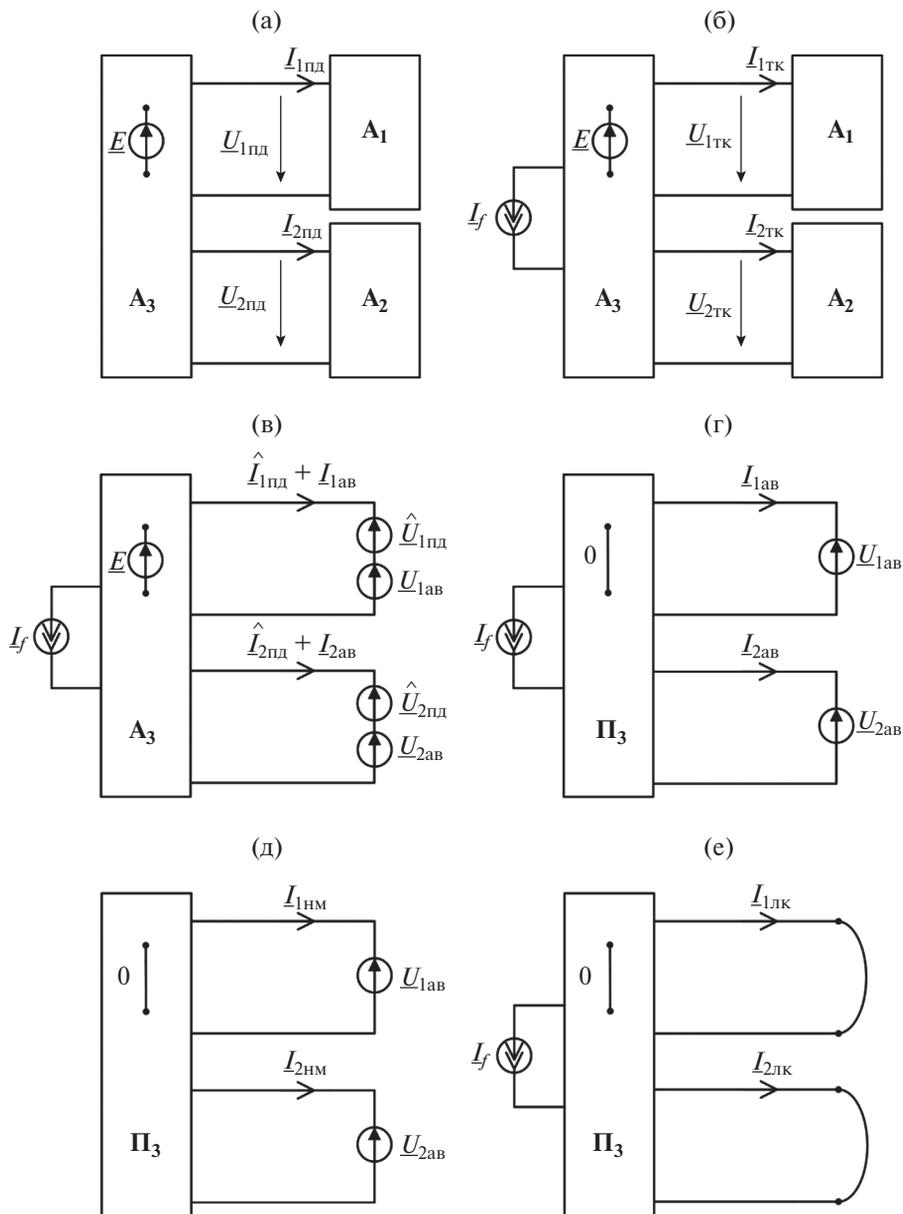


Рис. 1. Режимы наблюдаемого модуля линейной электрической структуры: (а) предшествующий; (б, в) текущий режим КЗ; (г) чисто аварийный; (д) нормальный; (е) локальный.

дыщей цепи (точки $f_{т1}$ и $f_{л1}$ или $f_{л2}$ и $f_{т2}$), и отдельно – в реакции на КЗ в точках $f_{ш1}$ и $f_{ш2}$ за местом наблюдения тока i_1 или i_2 на шинах нагрузки H_1 , или H_2 (“за спиной”).

В рассматриваемой сети модель нормального режима представляет собой соединение ее пассивных элементов, ведущих от первой системы шин ко второй (рис. 2б);

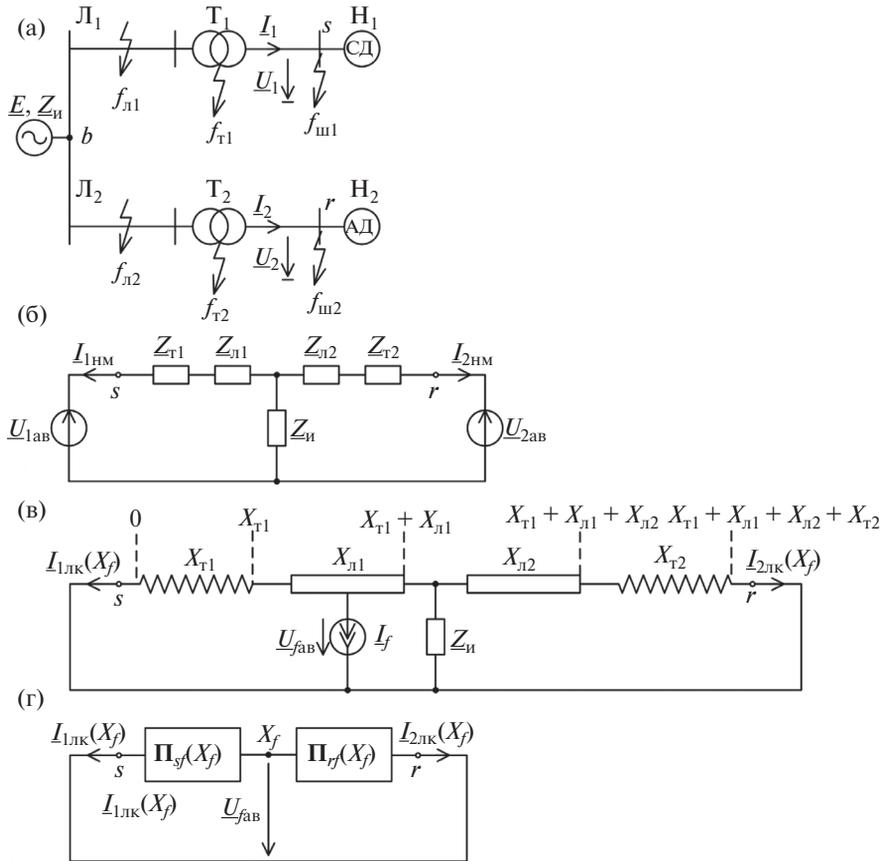


Рис. 2. Модели сети с двумя резервируемыми нагрузками: (а) имитационная модель; (б) модель нормального режима; (в, г) модель локального режима; (в) развернутая; (г) эквивалентированная относительно места КЗ.

здесь $\underline{Z}_{т1}$ и $\underline{Z}_{т2}$ – сопротивления трансформаторов; $\underline{Z}_{л1} = \underline{Z}_1^0 l_1$, $\underline{Z}_{л2} = \underline{Z}_2^0 l_2$ – сопротивления линий. Эта модель, операции с которой выполняются в реальном времени, задается тремя коэффициентами – двумя собственными проводимостями \underline{Y}_{11} , \underline{Y}_{22} и одной взаимной $\underline{Y}_{в3}$. Проводимости выражают нормальные токи через приложенные к модели напряжения

$$\underline{I}_{1нм} = -\underline{Y}_{11}\underline{U}_{1ав} + \underline{Y}_{в3}\underline{U}_{2ав}, \tag{3}$$

$$\underline{I}_{2нм} = \underline{Y}_{в3}\underline{U}_{1ав} - \underline{Y}_{22}\underline{U}_{2ав}; \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{11} &= -(\underline{Y}_2 + \underline{Y}_{в3}), \quad \underline{Y}_{22} = -(\underline{Y}_1 + \underline{Y}_{в3}), \\ \underline{Y}_1 &= \underline{Z}_1 / \underline{Z}^2, \quad \underline{Y}_2 = \underline{Z}_2 / \underline{Z}^2, \quad \underline{Y}_{в3} = \underline{Z}_и / \underline{Z}^2, \\ \underline{Z}_1 &= \underline{Z}_{т1} + \underline{Z}_{л1}, \quad \underline{Z}_2 = \underline{Z}_{т2} + \underline{Z}_{л2}, \quad \underline{Z}^2 = (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)\underline{Z}_и + \underline{Z}_1\underline{Z}_2. \end{aligned}$$

Помимо операций (3), (4) в алгоритме реального времени выполняется еще операция (2) определения локальных токов $\underline{I}_{1лк}$ и $\underline{I}_{2лк}$, а также операции формирования из них замера

$$K = \frac{\underline{I}_{1лк} - \underline{I}_{2лк}}{\underline{I}_{1лк} + \underline{I}_{2лк}} \quad (5)$$

и сравнения его с априорной функцией, устанавливающей зависимость замера (5) от места КЗ в питающей сети. Именно эти операции призваны решить основную задачу БАВР, давая ответ на вопрос о том, в какой из двух подводящих цепей произошло КЗ. Чтобы выявить механизм распознавания КЗ, необходимо рассмотреть свойства локального режима, а вслед за тем сформировать процедуру определения геометрического места замера (5). Однако уже на данном этапе построения алгоритма БАВР можно заметить, что обращение к локальным токам избавляет его от влияния параметров нагрузок H_1 и H_2 , отличающихся изменчивостью и свойством переходить при КЗ в сети из двигательного режима в генераторный. Возможность не учитывать нагрузки при определении априорной функции замера позволяет отнести данный алгоритм распознавания КЗ к числу унифицированных.

Априорная координатная функция замера. Она определяется в модели локального режима (рис. 2в), к особенностям которой относятся два обстоятельства. Во-первых, она предназначена не для обработки результатов наблюдения, а для установления априорной зависимости между отношением (5) и местом КЗ. Зависимость носит унифицированный характер, так как не зависит от величины переходного сопротивления КЗ, от вида КЗ, и одинакова для каждой из трех фаз. Во-вторых, модель локального режима представляет собой двухпроводный канал фазных безнулевых величин [3, 6, 7]

$$\underline{I}'_v = \underline{I}_v - \underline{I}_0, \quad \underline{U}'_v = \underline{U}_v - \underline{U}_0, \quad (6)$$

где $v = A, B, C$; $\underline{I}_0, \underline{U}_0$ – составляющие нулевой последовательности. Безнулевая величина образована наложением составляющих прямой и обратной последовательности, поэтому параметрами модели локального режима являются параметры прямой последовательности.

Земляные КЗ на стороне высокого напряжения сопровождаются появлением безнулевых составляющих во всех трех фазах, что следует из граничных условий в месте КЗ. Так, при КЗ на землю в фазе А в месте КЗ протекает ток \underline{I}_{Af} . Соответствующие значения безнулевых составляющих

$$\underline{I}'_{Af} = (2/3)\underline{I}_{Af}, \quad \underline{I}'_{Bf} = \underline{I}'_{Cf} = -(1/3)\underline{I}_{Af}.$$

А при двухфазном КЗ на землю фаз В и С протекают токи \underline{I}_{Bf} и \underline{I}_{Cf} , безнулевые составляющие которых в месте КЗ

$$\underline{I}'_{Af} = -(1/3)(\underline{I}_{Bf} + \underline{I}_{Cf}), \quad \underline{I}'_{Bf} = (1/3)(2\underline{I}_{Bf} - \underline{I}_{Cf}), \quad \underline{I}'_{Cf} = (1/3)(-\underline{I}_{Bf} + 2\underline{I}_{Cf}).$$

Отсюда следует, что и при земляных КЗ каждый из двухпроводных фазных каналов доставляет нужную информацию в место наблюдения.

Будем определять координату места предполагаемого КЗ, переходя от первой системы шин s ко второй системе шин r . В качестве координаты примем значение индуктивного сопротивления X_f элементов цепи от точки s до произвольного места предполагаемого КЗ, отнесенное к суммарному продольному индуктивному сопротивлению всей цепи

$$X_f^* = \frac{X_f}{X_{T1} + X_{л1} + X_{л2} + X_{T2}}, \quad (7)$$

где X_T – индуктивное сопротивление трансформаторов, а $X_{л}$ – линий.

У трансформатора T_1 началом отсчета его сопротивления служит вывод обмотки низшего напряжения, а у трансформатора T_2 – вывод обмотки высшего напряжения. У линий электропередачи координатой служит индуктивное сопротивление от одного из концов линии; у линии L_1 началом является место соединения с трансформатором, а у линии L_2 – место подключения к подстанции.

Левая и правая части модели по рис. 2в эквивалентноруются каждая относительно места f предполагаемого КЗ с координатой X_f пассивными блоками $\Pi_{sf}(X_f)$ и $\Pi_{rf}(X_f)$. Токи $I_{1лк}(X_f)$ и $I_{2лк}(X_f)$ в зашунтированных входах выражаются через одно и то же неизвестное напряжение $\underline{U}_{f\text{ав}}$. Так, в схеме рис. 2г при КЗ в первой линии в месте x_{f1} возникнут локальные токи

$$I_{1лк}(x_{f1}) = \frac{\underline{U}_{f\text{ав}}}{\underline{Z}_{\tau 1} + \underline{Z}_1^0 x_{f1}}, \quad (8)$$

$$I_{2лк}(x_{f1}) = \frac{\underline{Z}_{\text{и}}}{\underline{Z}^2(x_{f1})} \underline{U}_{f\text{ав}}, \quad (9)$$

$$\underline{Z}^2(x_{f1}) = \underline{Z}_{\text{и}} \left(\underline{Z}_1^0 (l_1 - x_{f1}) + \underline{Z}_{\text{л}2} + \underline{Z}_{\tau 2} \right) + \underline{Z}_1^0 (l_1 - x_{f1}) (\underline{Z}_{\text{л}2} + \underline{Z}_{\tau 2}).$$

Подстановка (8) и (9) в отношение (5) определит искомую функцию замера при КЗ в линии L_1

$$\underline{K}(x_{f1}) = \frac{\underline{Z}^2(x_{f1}) - \underline{Z}_{\text{и}} \left(\underline{Z}_{\tau 1} + \underline{Z}_1^0 x_{f1} \right)}{\underline{Z}^2(x_{f1}) + \underline{Z}_{\text{и}} \left(\underline{Z}_{\tau 1} + \underline{Z}_1^0 x_{f1} \right)}, \quad (10)$$

где $x_{f1} \in (0, X_{\text{л}1})$. Аналогичным образом определится функция координат других элементов цепи. Например, при КЗ во второй линии выражения, подобные (8), (9), меняются местами

$$I_{1лк}(x_{f2}) = \frac{\underline{Z}_{\text{и}}}{\underline{Z}^2(x_{f2})} \underline{U}_{f\text{ав}}, \quad (11)$$

$$I_{2лк}(x_{f2}) = \frac{\underline{U}_{f\text{ав}}}{\underline{Z}_{\tau 2} + \underline{Z}_2^0 (l_2 - x_{f2})}, \quad (12)$$

$$\underline{Z}^2(x_{f2}) = \underline{Z}_{\text{и}} \left(\underline{Z}_2^0 x_{f2} + \underline{Z}_{\text{л}1} + \underline{Z}_{\tau 1} \right) + \underline{Z}_2^0 x_{f2} (\underline{Z}_{\text{л}1} + \underline{Z}_{\tau 1}).$$

Отсюда

$$\underline{K}(x_{f2}) = \frac{\underline{Z}_{\text{и}} \left(\underline{Z}_{\tau 2} + \underline{Z}_2^0 (l_2 - x_{f2}) \right) - \underline{Z}^2(x_{f2})}{\underline{Z}_{\text{и}} \left(\underline{Z}_{\tau 2} + \underline{Z}_2^0 (l_2 - x_{f2}) \right) + \underline{Z}^2(x_{f2})}. \quad (13)$$

Функции (10) и (13) ведут себя противоположным образом, что особенно хорошо заметно при $\underline{Z}_{\text{и}} \rightarrow 0$, когда $\underline{K}(X_{f1} \in (0, X_{\tau 1})) \rightarrow 1$ и $\underline{K}(x_{f1} \in (0, X_{\text{л}1})) \rightarrow 1$, а $\underline{K}(x_{f2} \in (0, X_{\text{л}2})) \rightarrow (-1)$ и $\underline{K}(X_{f2} \in (0, X_{\tau 2})) \rightarrow (-1)$.

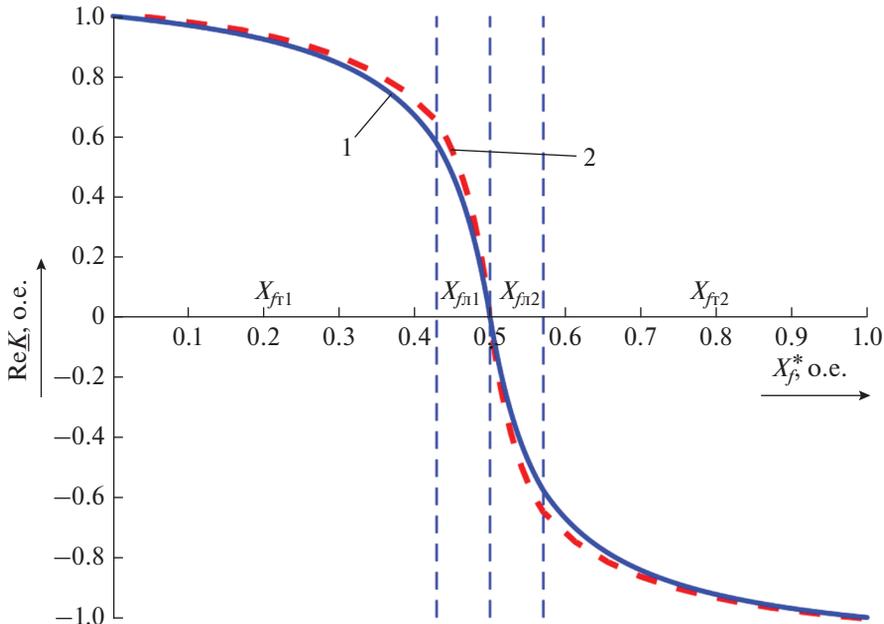


Рис. 3. Зависимость замера от координаты предполагаемого места КЗ: 1 — априорная, 2 — имитационная.

Априорная координатная функция замера в конкретной сети. Рассматривалась реальная сеть 110 кВ с идентичными линиями L_1 и L_2 и с идентичными трансформаторами T_1 и T_2 . Линии двухцепные протяженностью $l = 41.635$ км, провода АС-120/19. Трансформаторы T_1 и T_2 мощностью 10 МВА, 110/10 кВ, с потерями короткого замыкания 53.8 кВт. Сопротивление источника питания $\underline{Z}_{и} = 1 + j10$.

Функция замера в виде зависимости его вещественной части от координаты места КЗ в пределах каждого элемента подходящих к нагрузкам цепей определена для данной сети по формулам (8)–(13) и заключительного отношения (5). Результат приведен на рис. 3 (сплошная кривая).

Необходимо обратить внимание на отчетливо проявляющуюся закономерность: замеры при КЗ в первой и второй цепях различаются знаками, изменяясь в пределах от +1 при КЗ на выводах обмотки низшего напряжения трансформатора T_1 до (–1) при КЗ на аналогичных выводах второго трансформатора, а при КЗ в точке b , общей для обеих цепей (рис. 2а), замер принимает нулевое значение.

Подобная характеристика замера (5) в однородной линии, наблюдаемой с обеих сторон, имеет вид прямой, соединяющей те же граничные точки ± 1 , что и на рис. 3 [3, 4]. Резкий переход от положительных к отрицательным замерам при наблюдении системы на шинах нагрузок (рис. 2а) объясняется в первую очередь влиянием внутреннего сопротивления $\underline{Z}_{и}$ в модели локального режима (рис. 2в). В этом легко убедиться, если принять во внимание, что при $\underline{Z}_{и} \rightarrow 0$ зависимость по рис. 3 принимает вид прямоугольной функции, так как в неповрежденную цепь локальный ток поступить через это сопротивление не сможет.

Имитационная координатная функция замера. Для тестирования алгоритма БАВР привлекается имитационная модель сети (рис. 2а) с теми же пассивными параметрами, для которых ранее определялась априорная характеристика. В среде моделирования MATLAB – Simulink имитировалось металлическое трехфазное КЗ в различных

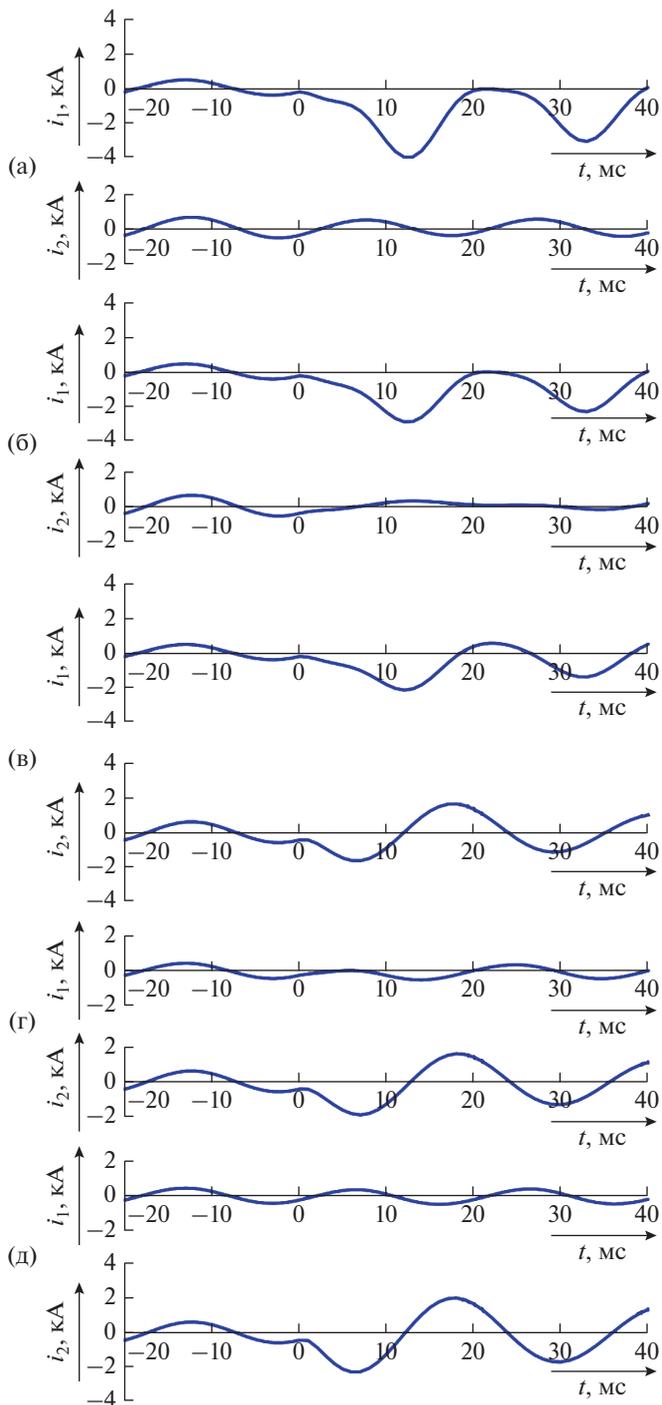


Рис. 4. Осциллограммы наблюдаемых токов металлических трехфазных КЗ в пяти местах имитационной модели: (а) на выводах обмотки низшего напряжения T_1 ; (б) в месте подключения T_1 к L_1 ; (в) на шинах “b”; (г) в месте подключения T_2 к L_2 ; (д) на выводах обмотки низшего напряжения T_2 .

точках сети. ЭДС источника $e(t) = E_m \cos \omega t$; момент КЗ $t = 0$; $E_m = 110\sqrt{2/3}$ кВ. Нагрузка сети – электродвигатели: H_1 – синхронные, H_2 – асинхронные, по два электродвигателя мощностью 2.3 МВА на каждой системе шин нагрузки. На рисунке 4 приведены полученные осциллограммы токов $i_1(t)$ и $i_2(t)$, наблюдаемых в фазе А. Токи в значительно большей степени, чем напряжения, искажены переходным процессом. Встает вопрос о цифровой обработке наблюдаемых процессов, а в более общем плане – о реализации метода в алгоритме БАВР. В статье уделено внимание реализации, основанной на представлении электрических величин в комплексном базисе. Но сам метод допускает более общую интерпретацию в базисе мгновенных значений [2]. Что же касается комплексного базиса, то он предполагает применение фильтров ортогональных составляющих, преобразующих выборку отсчетов наблюдаемой величины в комплексное число. Наиболее высоким быстродействием, измеряемым продолжительностью окна наблюдения, обладают адаптивные фильтры ортогональных составляющих [8]. Выяснилось, однако, что в большинстве случаев удовлетворительный результат обеспечивают неадаптивные фильтры, в том числе и наиболее широко применяемый в программном обеспечении терминалов релейной защиты и автоматики двухполупериодный фильтр Фурье [9].

По такому формальному показателю как время установления он не относится к числу быстродействующих. Но, как выяснилось, замер (5), для которого важно отношение комплексов локальных токов, а не каждый из них в отдельности, относительно малочувствителен к процессу установления идентичных фильтров в разных местах наблюдения. На рисунке 3 пунктиром показана имитационная функция замера, полученная на интервале наблюдения электрических величин продолжительностью в 8 мс. Она несколько отличается от априорной характеристики, полученной в модели синусоидального локального режима (рис. 2в). С расширением интервала обработки входного сигнала вплоть до 20 мс обе характеристики совпадают.

Обнаруженная зависимость $\underline{K}(X_f)$ решает задачу распознавания повреждений в разных частях сети по рис. 2а, питающей нагрузки H_1 и H_2 . Окрестность точки b – перехода характеристики через нулевое значение – свидетельствует о КЗ в источнике \underline{E}_s , \underline{Z}_s или вблизи его шин. В таком режиме действие БАВР не предусматривается. Положительная часть характеристики выше этой окрестности свидетельствует о КЗ в первой подводящей цепи, на случай чего предусматривается переключение нагрузки H_1 – отключение от первой цепи и подключение к шинам нагрузки H_2 . Отрицательная часть характеристики соответственно ниже нейтральной области в окрестности нуля предполагает противоположную реакцию БАВР. Остается особый режим КЗ на шинах нагрузки (точки $f_{ш}$ на рис. 2а), когда место КЗ оказывается вне наблюдаемой части системы. Коль скоро та не повреждена, то ее модель в нормальном режиме (рис. 2б) не отличается от модели исходного чисто аварийного режима, а в модели локального режима $\underline{I}_f \equiv 0$ (рис. 2в). Как следствие, $\underline{I}_{1лк} \equiv 0$ и $\underline{I}_{2лк} \equiv 0$, т.е. о данном режиме, не предполагающем вмешательства БАВР, свидетельствуют нулевые уровни локальных токов при высоком уровне аварийных составляющих наблюдаемых величин.

ВЫВОДЫ

1. Теоретические аспекты задачи быстрого аварийного включения резерва электропитания заключаются в распознавании поврежденной части электрической сети при наблюдении сети со стороны ее нагрузок. Характеру задачи отвечает метод распознавания коротких замыканий, основанный на разделении аварийных составляющих наблюдаемых токов на два компонента – нормальные и локальные токи.

2. Соотношение локальных токов разных мест наблюдения создает унифицированный замер: его зависимость от координаты места КЗ определяется априорно в двух-

проводных моделях сети с зашунтированными местами наблюдения и одним нормированным источником в месте предполагаемого повреждения. Замер инвариантен по отношению к таким изменяющимся параметрам сети, контроль которых невозможен или сопряжен с трудностями. Это переходное сопротивление КЗ; двигательная нагрузка, переходящая при КЗ в генераторный режим.

3. Алгоритм БАВР распознает в реальном времени в какой из подводящих цепей произошло КЗ и выполняет блокировку при КЗ в общей части сети, а также на шинах нагрузок. Основные операции связаны с определением нормальных токов как реакции пассивной модели неповрежденной сети на воздействие аварийных составляющих наблюдаемых напряжений.

4. Априорная характеристика замера явственно разделяется на три участка. Верхний и нижний соответствуют повреждению первой и второй подводящих цепей, а центральный — КЗ в общей части сети. В случае КЗ на шинах нагрузки индикатором режима служит отсутствие локальных токов при заметных аварийных составляющих токов и напряжений.

5. В базе комплексных величин быстродействие алгоритма определяется временем формирования комплексов фильтрами ортогональных составляющих. Зависимость от быстродействия фильтров смягчается тем обстоятельством, что замер является отношением комплексов локальных токов, которое стабилизируется до установления фильтров. Моделирование процессов показывает, что общеупотребительный в релейной защите двухполупериодный фильтр Фурье позволяет распознать КЗ за первый полупериод частоты сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пупин В.М. Методы, модели и средства обеспечения динамической устойчивости электротехнических систем непрерывных производств. Автореферат докт. диссертации. РГУ нефти и газа, 2019.
2. Лямец Ю.Я., Беянин А.А. Составляющие токов короткого замыкания в наблюдаемой электрической сети. Электротехника, 2016. № 10. С. 40–44.
3. Кочетов И.Д., Лямец Ю.Я., Макашкин Ф.А. Унификация моделей и характеристик поврежденной электропередачи при двухстороннем наблюдении. Изв. РАН. Энергетика, 2020. № 4. С. 55–65.
4. Кочетов И.Д., Лямец Ю.Я., Макашкин Ф.А. Распознающая способность локальных токов при двухстороннем наблюдении линии электропередачи. Электрические станции, 2020. № 6. С. 54–58.
5. Fikri M., El-Sayed M. New algorithm for distance protection of high voltage transmission lines. IEE Proc. 1988. V. 135. № 5. P. 436–440.
6. Попов И.Н., Лачугин В.Ф., Соколова Г.В. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов. Энергоатомиздат, 1986.
7. Лямец Ю.Я. К расчету переходных процессов в трехфазных цепях методом симметричных составляющих. Электричество, 1988. № 12. С. 57–60.
8. Иванов С.В., Лямец Ю.Я., Макашкин Ф.А. Оценка параметров элементарных компонентов электрической величины по малому числу отсчетов. Электротехника, 2020. № 3. С. 59–67.
9. Шнейерсон Э.М. Цифровая релейная защита. Энергоатомиздат, 2007.

Detection of Short Circuits in the Supply Circuits for the Purpose of Rapid Emergency Activation of the Power Reserve

I. D. Kochetov^a, Yu. Ya. Lyamets^a, F. A. Makashkin^{a, *}, and I. E. Petryashin^a

^a“Relematika”, LLC, Chuvash State University, Cheboksary, Russia

*e-mail: makashkin_fa@relematika.ru

We consider a peculiar problem of monitoring the state of the electrical network, observed from the side of loads, not from the sources, as in the case of traditional problems of relay protection and automation. The information bases of rapid automatic activation of the re-

serve of power supply of consumers are touched on. It is shown that the method of dividing the emergency components of the observed currents into two components – normal and local – conforms to the nature of the problem. The problem of detecting damage in the power supply circuit of one of the two loads is solved by measuring the ratio of local currents. The dependence of the measurement on the fault location is invariant relative to the transient resistance at the point of short circuit and the loads that operate in generator mode during short circuit. Local currents are defined in the complex basis. The real-time processing of the observed values is performed by the orthogonal component filter. The effect of filters on the performance of the algorithm is mitigated by the design of the measurement based on it.

Keywords: emergency activation of the reserve, short circuit, detection, fast action