

Распознавание повреждения линии электропередачи в режиме каскадного отключения

- Лямец Ю. Я., доктор техн. наук, ООО “Релематика”; Чувашский государственный университет, Республика Чувашия, Чебоксары
- Мартынов М. В., канд. техн. наук, ООО “Релематика”, Республика Чувашия, Чебоксары
- Никонов И. Ю.¹, ООО “Релематика”; Чувашский государственный университет, Республика Чувашия, Чебоксары

Проведена новая апробация представленного ранее метода распознавания повреждённого ответвления при одностороннем наблюдении линии электропередачи. Рассмотрена реальная линия небольшой длины с четырьмя ответвлениями, два из которых практически идентичны. Линия связывает мощный источник с маломощным. Каждое ответвление характеризуется априорным годографом, а наблюдаемый режим отображается координатным годографом, ожидаемое пересечение которого с априорным годографом повреждённого ответвления должно произойти при совпадении координат ответвления и годографа. Обнаружилась неоднозначность решения при повреждении одного из идентичных ответвлений, если наблюдение ведётся с передающей стороны линии. Вместе с тем, при наблюдении с приёмной стороны повреждение распознавалось однозначно. Показано, что и с передающей стороны линии можно обеспечить однозначное распознавание, если прибегнуть к каскадному отключению линии.

Ключевые слова: линия электропередачи, ответвление, повреждение, распознавание, дальнее резервирование.

Линия электропередачи с двухсторонним питанием наблюдается на обеих сторонах. Вместе с тем наблюдение считается двухсторонним только в том случае, если предусмотрен обмен информацией между её сторонами. В противном случае наблюдение считается односторонним. По сравнению с двухсторонним наблюдением информационная база одностороннего наблюдения весьма ограничена. Поиск возможностей её пополнения актуален по следующим причинам. Во-первых, на сегодняшний день одностороннее наблюдение все ещё более распространено. А во-вторых, при нарушении канала связи двухстороннее наблюдение естественным образом сводится к одностороннему [1 – 3].

Наблюдение добавляет к априорной информации о структуре и параметрах линии электропередачи текущую информацию – токи и напряжения в двух сменяющих один другого режимах. В базисе комплексных величин это $I_{\text{кз}}$, $U_{\text{кз}}$ – фазные величины режима короткого замыкания (КЗ), а ещё $I_{\text{пд}}$, $U_{\text{пд}}$ – величины предшествующего ему режима. Особую информационную ценность представляют аварийные составляющие $I_{\text{ав}}$, $U_{\text{ав}}$, дополняющие величины предшествующего режима, пролонгированные на время после его завершения.

¹ Никонов Иван Юрьевич: Ivan04031997@gmail.com

до величин нового режима. Если предшествующий режим был стационарен, то

$$\begin{aligned} I_{\text{ав}} &= I_{\text{кз}} - I_{\text{пд}}; \\ U_{\text{ав}} &= U_{\text{кз}} - U_{\text{пд}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Аварийные составляющие интерпретируются как проявление чисто аварийного режима, активируемого источником в месте коммутации и производного от текущего и предшествующего режимов [4].

Нередко складывается ситуация, при которой информационный ресурс наблюдения линии на одной её стороне оказывается достаточным для распознавания КЗ, а на другой стороне – недостаточным. Основной причиной следует считать явление абсолютной неотличимости режима КЗ, например, от подключения линии к сети или коммутации в сети за пределами линии [1, 3]. Нераспознаваемость режима КЗ ощущается особенно остро в задаче дальнего резервирования защите ответвлений линии электропередачи. В линии с ответвлениями складываются разные условия наблюдения на приёмной и передающей сторонах. На передающей стороне, где требуется предусмотреть отстройку от подключения нагрузки на противоположном конце линии, условия распознавания КЗ сложнее. Если произойдёт отключение повреждённой линии только с одной стороны, то ре-

жим линии, оставаясь аварийным, изменит свой характер. Информационная база наблюдения на стороне, остающейся неотключённой, пополнится, что улучшает условия распознавания КЗ и приводит, как следствие, к каскадному отключению повреждённой электропереходи.

Эффект, производимый расширением информационной базы при каскадном отключении, продемонстрируем на примере ещё более сложной для распознавания, чем дальнее резервирование, задачи выявления повреждённого ответвления линии электропереходи [5]. В модели фазного двухпроводного канала линии (рис. 1, а) показано i -е ответвление, в котором произошло трёхфазное КЗ. Передающая и приёмная системы, отмеченные индексами s и r , представлены активными двухполюсниками A_s и A_r , в то время как повреждённое ответвление замещается пассивным четырёхполюсником Π_i , связывающим вход ответвления с местом КЗ, которое имитируется переходным сопротивлением R_f . На модели указаны наблюдаемые величины I_s , U_s , а также неизвестное напряжение U_i на повреждённом ответвлении и неизвестный ток КЗ $I_{f,i}$. Указаны также момент КЗ $t = 0$ и момент отключения приёмной стороны $\Delta t_{\text{ко}}$, где индекс символизирует начало каскадного отключения линии. Остальные модели (рис. 1, б–ж) воспроизводят реальные и виртуальные режимы наблюдаемой линии. Активный двухполюсник A_s показан в этих моделях как эквивалентный генератор с изначально неизвестными параметрами E_s и Z_s . Так происходит в модели предшествующего режима (рис. 1, б), где Z_i – входное сопротивление четырёхполюсника Π_i при $R_f \rightarrow \infty$. То же поначалу происходит и в модели текущего режима КЗ (рис. 1, в) с неизвестным током КЗ $I_{f,kz}$, который становится источником чисто аварийного режима в пассивной модели (рис. 1, г), где элемент Π_r представляет собой двухполюсник A_r после исключения из него источников. Но на этом этапе наблюдения линии параметры передающей стороны как эквивалентного генератора становятся известными:

$$Z_s = -U_{sab} / I_{sab}; \quad (2)$$

$$E_s = U_{skz} + Z_s I_{skz}. \quad (3)$$

Третий наблюдаемый режим, вызванный отключением приёмной стороны в момент $t = \Delta t_{\text{ко}}$ (рис. 1, д), изменяет её граничные условия. Вместе с тем изменяется значение тока КЗ. Одно неизвестное значение $I_{f,kz}$ сменяется другим $I_{f,ko}$. Реальным предшествующим режимом на этот раз является текущий режим КЗ (рис. 1, в), но это не означает, что его можно представить в виде составной части нового режима каскадного отключения, так как к моделям по рис. 1, в, д из-за различия токов КЗ метод наложения в прежнем виде неприменим. Тем не менее, имеется возможность привлечь

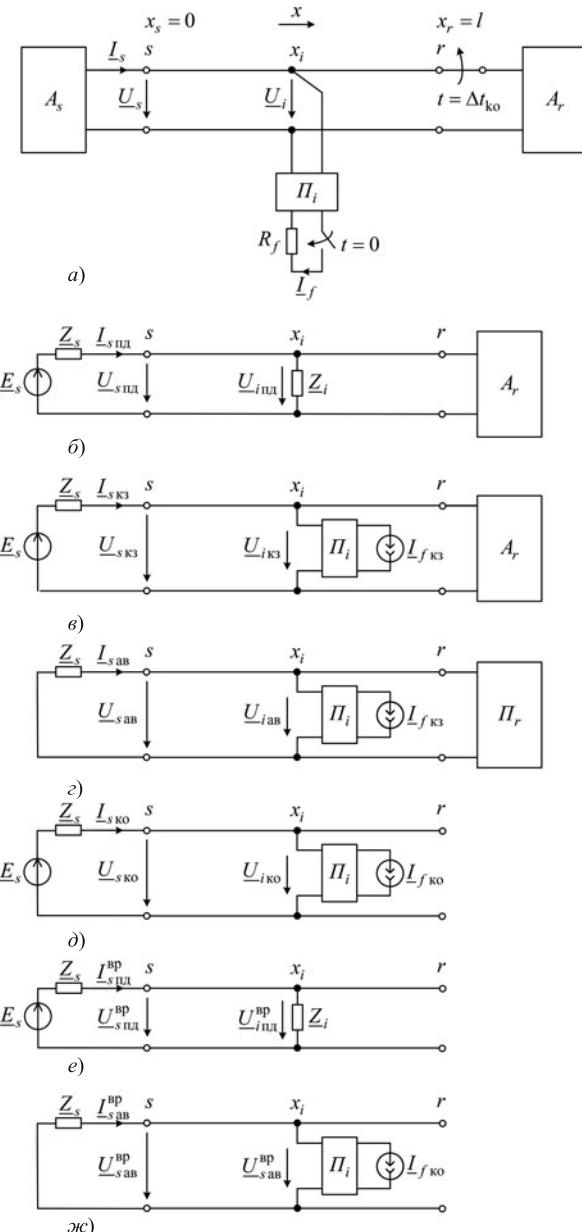


Рис. 1. Модели линии электропереходи с ответвлением:

а – общая имитационная модель; б – ж – модели частных режимов: б – предшествующего; в – короткого замыкания в ответвлении; г – чисто аварийного; д – каскадного отключения; е, ж – виртуальных предшествующего и чисто аварийного

информацию, накопленную ко времени отключения линии, а именно параметры (2), (3) эквивалентного генератора передающей системы. Новшеством можно считать создание модели виртуального предшествующего режима (рис. 1, е) с известным эквивалентным генератором, прежней моделью ответвления Π_i и разомкнутым выходом. Реакцией новой модели на воздействие источника E_s будут виртуальные величины $I_{s,pl}^{bp}$ и $U_{s,pl}^{bp}$ искусственно созданного второго предшествующего режима. Если $Z_{s,bx}$ – сопротивление пассивной мо-

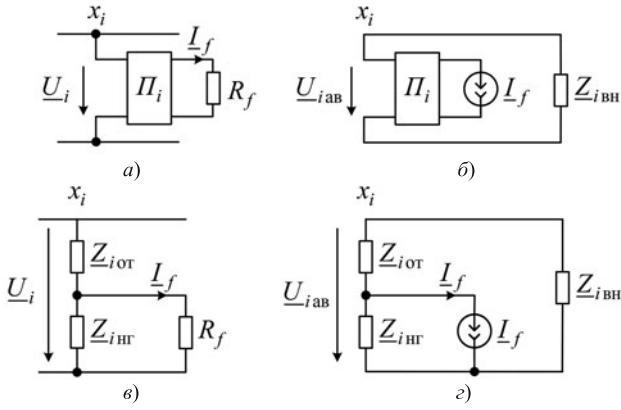


Рис. 2. Модели повреждённого ответвления, определяющие его годограф:

а, б – произвольные модели; в, г – двухэлементные модели; а, в – в текущих режимах повреждения; б, г – в чисто аварийных режимах

дели линии по рис. 1, е относительно входных зажимов s , то

$$I_{s\text{нд}}^{\text{вр}} = E_s / (Z_s + Z_{s\text{вх}}). \quad (4)$$

В итоге появляется возможность построить модель нового виртуального чисто аварийного режима, активируемого нынешним током КЗ $I_{f\text{ко}}$ (рис. 1, ж). Виртуальные аварийные составляющие наблюдаемых величин $I_{s\text{кз}}$, $U_{s\text{кз}}$ определяются, как в выражениях (1):

$$\begin{aligned} I_{s\text{вр}}^{\text{вр}} &= I_{s\text{ко}} - I_{s\text{нд}}^{\text{вр}}; \\ U_{s\text{вр}}^{\text{вр}} &= U_{s\text{ко}} - U_{s\text{нд}}^{\text{вр}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Воспользуемся методом функциональных замеров, предназначенным для распознавания КЗ в линии электропередачи при одностороннем наблюдении [6], а именно в той его модификации, которая ориентирована на выявление повреждённого ответвления. Замер, определяемый в некотором месте линии с координатой x , представляет собой отношение напряжения в этом месте $\underline{U}(x)$ к его аварийной составляющей. В режиме КЗ (рис. 1, в)

$$\underline{K}_{\text{кз}}(x) = \frac{\underline{U}_{\text{кз}}(x)}{\underline{U}_{\text{ав}}(x)}, \quad (6)$$

а в режиме каскадного отключения

$$\underline{K}_{\text{ко}}(x) = \frac{\underline{U}_{\text{ко}}(x)}{\underline{U}_{\text{ав}}^{\text{вр}}(x)}. \quad (7)$$

Для решаемой задачи особенно важны замеры на входах в ответвления ($x = x_i$)

$$\underline{K}(x_i) = \frac{\underline{U}_i}{\underline{U}_{i\text{ав}}}. \quad (8)$$

В частных случаях, когда $\underline{U}_i = \underline{U}_{i\text{кз}}$, получим замер $\underline{K}_{\text{кз}}(x_i)$, а когда $\underline{U}_i = \underline{U}_{i\text{ко}}$ и $\underline{U}_{i\text{ав}} = \underline{U}_{i\text{ав}}^{\text{вр}}$, будем иметь замер $\underline{K}_{\text{ко}}(x_i)$.

Применяемый здесь метод распознавания повреждения заключается в определении двух типов функциональных замеров. Априорные функции характеризуют зависимость замеров от аварийных параметров ответвлений, в первую очередь от переходных сопротивлений. Это функции (8), (9) $\underline{K}_i(R_f)$ – годографы ответвлений, не имеющие отношения к наблюдению объекта и определяемые заранее. Текущая функция наблюдения $\underline{K}(x)$, $x \in (0, l)$, в которой аргумент x трактуется как координата места подсоединения повреждённого ответвления, представляет собой координатный годограф, идущий вдоль всей линии. Пересечение годографа наблюдаемого режима $\underline{K}(x)$ со стационарными годографами $\underline{K}_i(R_f)$ укажет значения их аргументов

$$\underline{K}(x) = \underline{K}_i(R_f) \Rightarrow \hat{x}_i, \hat{R}_f, \quad (9)$$

помеченные здесь символом оценки. Критерием распознавания повреждённого ответвления будет близость значения \hat{x}_i к значению x_i координаты подсоединения к линии i -го ответвления.

Годограф замера (8) определяется моделью ответвления как линейная функция переходного сопротивления R_f [6]

$$\underline{K}_i(R_f) = \underline{K}_{i0} + \underline{Y}_i R_f, \quad (10)$$

параметры \underline{K}_{i0} и \underline{Y}_i определяются в свою очередь коэффициентами прямой (обратной) передачи ответвления как четырёхполюсника Π_i (рис. 2, а, б), а кроме того переходным сопротивлением R_f и сопротивлением $Z_{i\text{вн}} = Z_{i\text{вн}} \exp j\varphi_{i\text{вн}}$ системы как эквивалентного генератора относительно i -го ответвления. Простейшей модификацией модели Π_i является последовательное соединение сопротивлений $Z_{i\text{от}}$ и $Z_{i\text{нг}}$ (рис. 2, в, г), для которой

$$\underline{K}_{i0} = -\frac{Z_{i\text{от}}}{Z_{i\text{вн}}} \left(1 + \frac{Z_{i\text{от}} + Z_{i\text{вн}}}{Z_{i\text{нг}}} \right); \quad (11)$$

$$\underline{Y}_i = -\frac{1}{Z_{i\text{вн}}} \left(1 + \frac{Z_{i\text{от}}}{Z_{i\text{нг}}} \right) \left(1 + \frac{Z_{i\text{от}} + Z_{i\text{вн}}}{Z_{i\text{нг}}} \right). \quad (12)$$

Если принять реальное предположение, что $Z_{i\text{нг}} = \text{mod}Z_{i\text{нг}} \gg \text{mod}(Z_{i\text{от}} + Z_{i\text{вн}})$, то из выражений (11) и (12) получим

$$\underline{K}_{i0} = \frac{Z_{i\text{от}}}{Z_{i\text{вн}}} \exp j(\pi + \varphi_{i\text{от}} - \varphi_{i\text{вн}}), \quad (13)$$

а уравнение годографа ответвления (10) становится функцией обобщённого параметра $\rho_i = R_f/Z_{i\text{вн}}$, нивелирующего роль модуля внутреннего сопротивления $Z_{i\text{вн}}$

$$\underline{K}_i(\rho_i) = \underline{K}_{i0} + \rho_i \exp j(\pi - \varphi_{i\text{вн}}). \quad (14)$$

С изменением параметра ρ функция (14) описывает на плоскости \underline{K} годограф в виде луча, берущего начало в точке \underline{K}_{i0} . Угол наклона луча определяется аргументом внутреннего сопротивления $\varphi_{i\text{вн}}$. Отсюда следует, что именно этот априорный параметр играет центральную роль в определении годографа (9) повреждённого ответвления. Величина угла $\varphi_{i\text{вн}}$ тем меньше, чем выше потери. В системе без потерь $\varphi_{i\text{вн}} = \pi/2$.

Координатные функции (6), (7) определяются путём преобразования наблюдаемых или виртуальных величин I_s, U_s в напряжение $U(x)$ произвольного места линии с координатой x в предположении, что место повреждения с координатой x_f более удалено от места наблюдения: $x_f > x$. Так, для линии с удельным сопротивлением \underline{Z}^0 (рис. 3)

$$U(x) = \begin{cases} \underline{U}_s - \underline{Z}^0 I_s, & 0 < x \leq x_1; \\ \dots & \dots \\ \underline{U}_i - \underline{Z}^0 (x - x_i) I_i, & x_i < x \leq x_{i+1}; \end{cases} \quad (15)$$

$$\underline{U}_i = \underline{U}_{i-1} - \underline{Z}^0 (x_i - x_{i-1}) I_{i-1};$$

$$I_i = I_{i-1} - \underline{U}_i / \underline{Z}_i.$$

Замер (6), определяемый подобным образом, правомерно относить к месту предполагаемого повреждения, где бы оно ни располагалось в пределах от $x = 0$ до $x = l$.

Проиллюстрируем изложенные положения на примере воздушно-кабельной линии электропередачи 110 кВ Новокремлёвская – Западная Казанских электрических сетей протяжённостью $l = 10,3$ км с четырьмя ответвлениями (рис. 4, а).

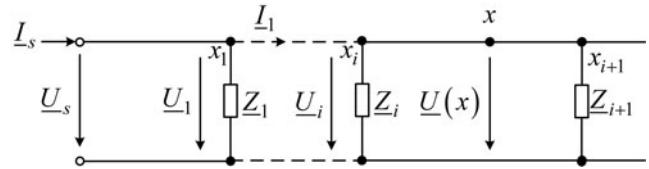


Рис. 3. Преобразование входных величин в напряжение места предполагаемого повреждения

Обозначениями ВЛ и КЛ отмечены воздушные и кабельные участки. Координаты ответвлений – 1,27; 2,43; 4,5; 7,72 км. Трансформатор первого ответвления 16 МВ·А, 110/6 кВ. Остальных ответвлений 110/35 кВ мощностью 40, 2 × 40, 40 МВ·А. Коэффициенты загрузки трансформаторов – 0,7. Длины ответвлений $l_{\text{от}}$: 121 м; 1,68 км; 0; 25 м. Сопротивления КЗ трансформаторов ответвлений: первого – $4,39 + j86,8$ Ом, второго и четвёртого – $1,41 + j36$ Ом, третьего – $2,81 + j68,6$ Ом. Сопротивления нагрузки ответвлений: первого – $1227 + j1636$ Ом, остальных – $491 + j654$ Ом. Участки линии между вторым и третьим ответвлением: ВЛ – 1,12 км, КЛ – 948 м; между третьим и четвёртым: КЛ – 322 м, ВЛ – 2,89 км. Сопротивления передающей и приёмной систем: $\underline{Z}_s = 1 + j10$ Ом, $\underline{Z}_r = 30 + j80$ Ом. Активное удельное сопротивление всех участков воздушной линии и ответвлений одинаково: $R^0 = 0,162$ Ом/км. Индуктивные удельные сопротивления различаются. У первых трёх участков воздушной линии – $X^0 = 0,395$ Ом/км, у двух последних участков и второго и третьего ответвлений – $X^0 = 0,346$ Ом/км, у первого ответвления – $X^0 = 0,412$ Ом/км. Удельные параметры участков ка-

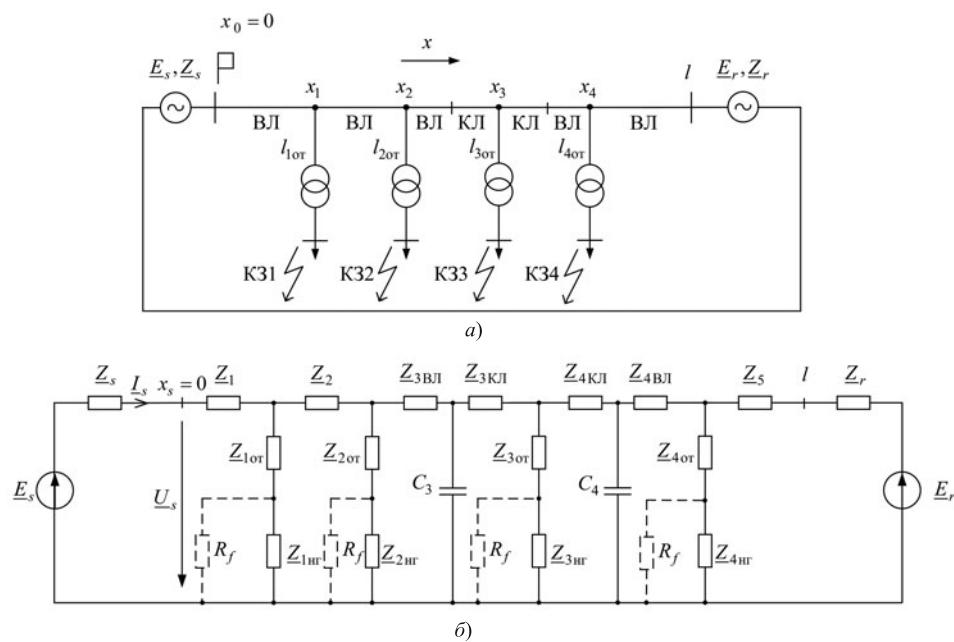


Рис. 4. Линия электропередачи 110 кВ с четырьмя ответвлениями (а) и её имитационная модель (б)

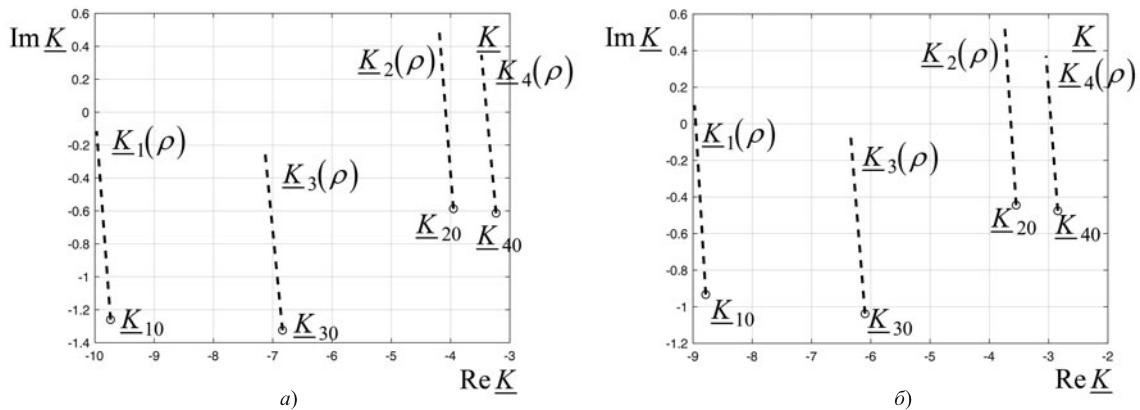


Рис. 5. Годографы повреждённых ответвлений:

a – при двухстороннем питании линии; *б* – при одностороннем питании (отключение правой стороны)

бельной линии: $Z^0 = 0,037 + j0,412 \text{ Ом/км}$, $C^0 = 19,2 \text{ мкФ/км}$.

В имитационной модели электропередачи (рис. 4, *б*) участки воздушной линии представлены сопротивлениями $Z_1, Z_2, Z_{3 \text{ вл}}, Z_{4 \text{ вл}}, Z_5$, а участки кабельной линии представлены Γ - и L -образными моделями $C_3 - Z_{3 \text{ кл}}$ и $Z_{4 \text{ кл}} - C_4$. Ответвления моделируются сопротивлениями нагрузки $Z_{i \text{ нг}}$ и сопротивлениями подводящих элементов $Z_{3 \text{ от}}$.

Дальнейшее относится к режимам КЗ на шинах нагрузок ответвлений. Такие режимы характеризуются в первую очередь внутренними сопротивлениями системы как эквивалентного генератора относительно места КЗ: $Z_{i \text{ вн}} = Z_{i \text{ вн}} \angle \varphi_{i \text{ вн}}$. В режиме КЗ при двухстороннем питании $Z_{i \text{ вн,кз}}$, а в режиме каскадного отключения при одностороннем питании – $Z_{i \text{ вн,ко}}$. Для модели по рис. 4, *б* $Z_{i \text{ вн,кз}}$ ($i = 1, 4$, $= 0,21; 9,62; 10; 1; 10,9 \text{ Ом}$), $\varphi_{i \text{ вн,кз}}$ ($i = 1, 4$, $= 81,15^\circ, 80,61^\circ, 79,91^\circ, 78,53^\circ$), $Z_{i \text{ вн,ко}}$ ($i = 1, 4$, $= 10,3; 10,8; 11,4; 12,5 \text{ Ом}$), $\varphi_{i \text{ вн,ко}}$ ($i = 1, 4$, $= 82,5^\circ; 82^\circ; 81,3^\circ; 79,83^\circ$).

Априорные годографы повреждённых ответвлений приведены на рис. 5 для режимов КЗ как при двухстороннем, так и при одностороннем питании.

Допустим, предшествующий режим создавался источниками $E_s = E_r = U_{\text{ном}}$ при угле передачи 30° , а трёхфазное КЗ на шинах нагрузки одного из ответвлений характеризуется переходным сопротивлением $R_f = 0,5 \text{ Ом}$ (во вторичных величинах). В имитационной модели по рис. 4, *б* создавались три реальных режима – предшествующий, короткого замыкания, каскадного отключения. Информацию о наблюдаемых режимах представляли три пары электрических величин в месте наблюдения $x_s = 0$: $I_{s \text{ пд}} = 0,8 \angle 9,34^\circ \text{ кА}$, $U_{s \text{ пд}} = 106,66 \angle 26,09^\circ \text{ кВ}$; $I_{s \text{ кз}} = 1,4 \angle -30,09^\circ \text{ кА}$, $U_{s \text{ кз}} = 97,36 \angle 26,61^\circ \text{ кВ}$. Этих данных достаточно для определения пары

метров эквивалентного генератора по выражениям (2), (3): $Z_s = 10,05 \angle 84,29^\circ \text{ Ом}$, $E_s = 110 \angle 30^\circ \text{ кВ}$, что позволяет воспроизвести в модели по рис. 4, *б* режим каскадного отключения. Входное сопротивление модели без повреждения и с отключённой приёмной стороной $Z_{\text{вх}} = 263 \angle 54,8^\circ \text{ Ом}$, что определяет ток по формуле (4) $I_{s \text{ пд}}^{\text{вр}} = 0,42 \angle -25,94^\circ \text{ кА}$ и напряжение $U_{s \text{ пд}}^{\text{вр}} = E_s + Z_s I_{s \text{ пд}}^{\text{вр}} = 106,3 \angle 28,92^\circ \text{ кВ}$.

В модели с отключённой приёмной стороной имитировался режим каскадного отключения, в котором оказались величины $I_{s \text{ ко}} = 1,39 \angle -49,8^\circ \text{ кА}$ и $U_{s \text{ ко}} = 96,07 \angle 29,35^\circ \text{ кВ}$. К величинам, полученным моделированием, добавляются две пары величин $I_{s \text{ ав}}$, $U_{s \text{ ав}}$ и $I_{s \text{ ав}}^{\text{вр}}$, $U_{s \text{ ав}}^{\text{вр}}$, определяемых как разности из выражений (1) и (5). Пары величин I_s , U_s разных режимов преобразуются каждая в свою функцию $\underline{U}(x)$ по общему правилу (15), а из напряжений соответствующих режимов формируются координатные годографы (6) и (7). Процедура распознавания повреждённого ответвления выполняется сначала для линии с двухсторонним питанием (рис. 6), а затем – с односторонним питанием в режиме каскадного отключения (рис. 7).

Как и на рис. 5, априорные годографы ответвлений, имеющие форму лучей, показаны пунктирными линиями $K_i(\rho)$. Для координатных годографов введены обозначения $\underline{K}^{(f)}(x)$, где верхний индекс *f* указывает номер ответвления, в котором произошло КЗ.

Процедура распознавания повреждённого ответвления завершается анализом точек пересечения координатного годографа $\underline{K}^{(f)}(x)$ с годографами ответвлений $K_i(\rho)$. Точки пересечения рассмотрены на встроенных графиках в пятикратном масштабе. Если координатный годограф пересекает годограф только одного ответвления, то, каза-

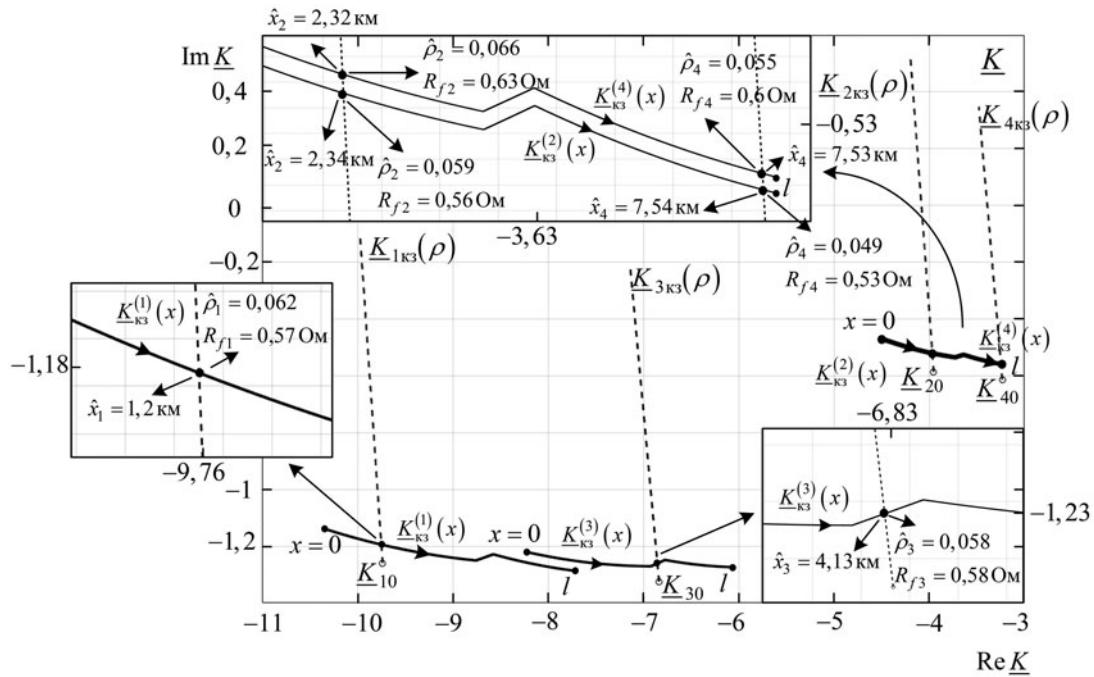


Рис. 6. Распознавание повреждённых ответвлений при КЗ в линии с двухсторонним питанием (наблюдение с передающей стороны)

лось бы, результат очевиден. Тем не менее, небезынтересно узнать значения параметров x , ρ и, быть может, R_f в точке пересечения. Вся эта информация отражена на рисунках. Так, на рис. 6 при повреждении первого ответвления координата точки пересечения $\hat{x}_1 = 1,2$ км (точное значение $x_1 = 1,27$ км). При повреждении третьего ответвления – $\hat{x}_3 = 4,13$ км (точное значение $x_3 = 4,5$ км), что можно считать вполне приемлемым результатом. Вопросы возникают при повреждении второго и четвёртого ответвлений, когда имеет место неоднозначность, обусловленная тем, что ответвления не отличаются друг от друга, сопротивление участков короткой линии несопоставимо меньше сопротивления трансформаторов, а влияние мало мощной приёмной системы ощущается слабо. Координатные годографы $K_{k3}^{(2)}(x)$ и $K_{k3}^{(4)}(x)$ различаются в итоге крайне незначительно и пересекают два априорных годографа $K_{2k3}(\rho)$ и $K_{4k3}(\rho)$. Координаты точек пересечения при замыкании во втором ответвлении $\hat{x}_2 = 2,34$ км и $\hat{x}_4 = 7,54$ км, а при замыкании в четвёртом ответвлении $\hat{x}_2 = 2,32$ км, $\hat{x}_4 = 7,53$ км. Истинные значения – $x_2 = 2,43$ км, $x_4 = 7,71$ км. Как видим, в данном состоянии линии повреждения второго и четвёртого ответвлений взаимно неотличимы.

Распознаваемость повреждённых ответвлений улучшается после отключения приёмной стороны линии (рис. 7). При повреждении первого ответвления – $\hat{x}_1 = 1,24$ км, третьего ответвления – $\hat{x}_3 = 4,32$ км, что практически совпадает с точными значениями. Но главным эффектом становится расхождение годографов $K_{k3}^{(2)}(x)$ и $K_{k3}^{(4)}(x)$, причём

$K_{k3}^{(2)}(x)$ не достигает луча $K_{4k3}(\rho)$, как это было в прежнем режиме. При повреждении второго ответвления единственная точка пересечения годографов $\hat{x}_2 = 2,38$ км, что также близко к точному значению. Двойное пересечение остаётся только при повреждении четвёртого ответвления. Но на этот раз координаты пересечения – $\hat{x}_2 = 2,02$ км и $\hat{x}_4 = 7,68$ км. Последнее практически совпадает с точным значением.

Остаётся убедиться, что защита дальнего резервирования на приёмной стороне линии обладает достаточным информационным ресурсом для распознавания повреждения в любом ответвлении. Одно её преимущество перед защитой другой стороны уже отмечалось: она не нуждается в отстройке от замыкания выключателя на противоположной стороне. Но неизвестно, справится ли она с распознаванием повреждённых ответвлений.

В предшествующем режиме на приёмной стороне линии наблюдались значения $I_{r\text{pd}} = 0,55 \angle -141,7^\circ$ кА, $U_{r\text{pd}} = 105,58 \angle 24,9^\circ$ кВ, а в режиме КЗ – $I_{r\text{kz}} = 0,57 \angle -126,3^\circ$ кА, $U_{r\text{kz}} = 92,76 \angle 26,1^\circ$ кВ. Алгоритм преобразования пары величин I_r , U_r в напряжение места предполагаемого повреждения сохранит форму выражения (15), если ввести для него координату $x' = l - x$ и обратную последовательность номеров ответвлений, после чего можно будет вернуться к исходной координате x и прежней нумерации ответвлений. Априорные годографы ответвлений инвариантны, т.е. не зависят от места наблюдения. Координатные годографы обозначаются на этот раз как

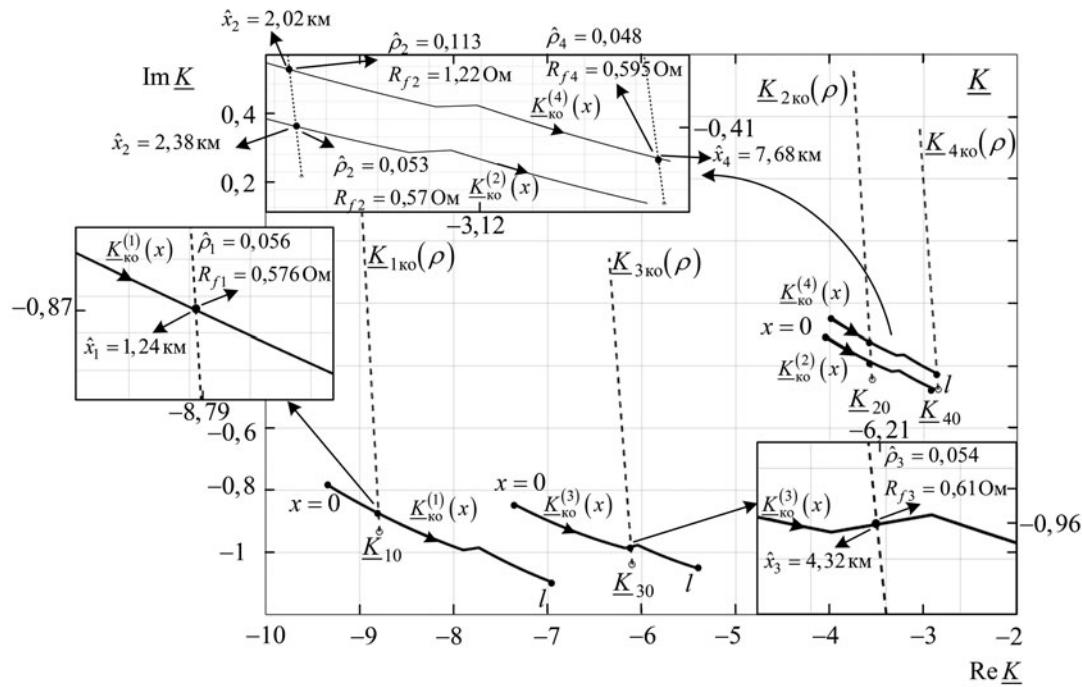


Рис. 7. Распознавание повреждённых ответвлений в режиме каскадного отключения

$\underline{K}_{\leftarrow}^{(i)}(x)$, где стрелка говорит о наблюдении линии с иной стороны, чем это было до сих пор. Априорные и координатные годографы совмещены на рис. 8. По сравнению с первоначальным наблюдением можно отметить эффект кардинального сокращения протяжённости координатных годографов, позитивным следствием чего стало устранение проблемы неоднозначности определения повреждённого ответвления, а негативным – снижение точности оценивания координаты повреждённого ответвления по точке пересечения годо-

графов, если сравнивать с точностью, достигаемой наблюдением передающей стороны линии.

Выводы

- Инструмент распознавания повреждения линии электропередачи образован совокупностью годографов. Априорные годографы мест предполагаемого повреждения не имеют отношения к наблюдению линии. Наблюданное состояние линии отображается координатным годографом в пред-

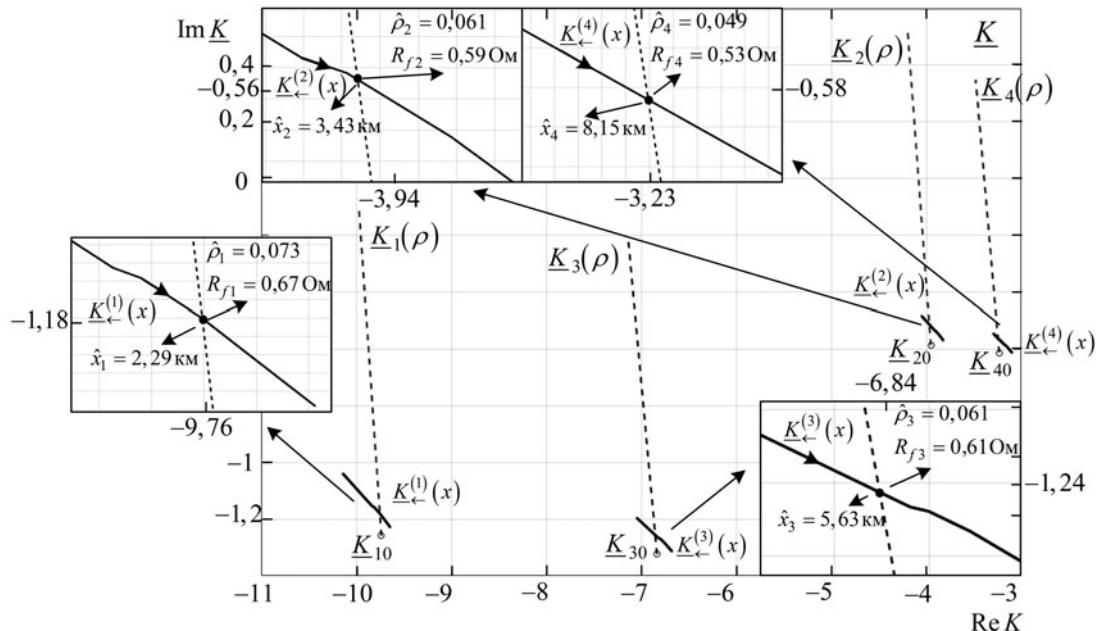


Рис. 8. Распознавание повреждённых ответвлений при наблюдении линии с приёмной стороны

положении, что линия не повреждена. Применение инструментария продемонстрировано в статье на непростой задаче распознавания повреждённого ответвления в реальной короткой линии с четырьмя ответвлениями.

2. Обнаружено различие в распознаваемости повреждений по результатам наблюдения линии с передающей и с приёмной сторон. По результатам наблюдения линии с передающей стороны не удалось установить, в каком из двух идентичных ответвлений произошло КЗ, в то время как наблюдение линии с приёмной стороны дало однозначное решение задачи. Режим каскадного отключения линии расширяет информационную базу её одностороннего наблюдения, благодаря чему повышается распознаваемость повреждений с передающей стороны линии. Большие выдержки времени, характерные для защиты дальнего резервирования, открывают возможность введения некоторого различия между временами срабатывания защит на разных сторонах линии с тем, чтобы приёмная сторона отключилась первой. Существенно, что вместе с тем отпадает необходимость в отстройке защиты от режима коммутации на противоположной стороне линии.

Список литературы

1. Мартынов, М. В. Особенности реализации защиты дальнего резервирования ответвительных подстанций [Текст] / М. В. Мартынов, С. В. Иванов, И. Д. Кочетов, И. Ю. Никонов, А. Н. Маслов // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 4. – С. 8 – 13.
2. Нагай, В. И. Возможности повышения технического совершенства системы дальнего резервирования релейной защиты трансформаторов ответвительных подстанций при симметричных КЗ [Текст] / В. И. Нагай, И. В. Нагай, С. В. Сарры, В. В. Нагай, П. С. Киреев // Релейщик. – 2020. – № 1. – С. 10 – 13.
3. Мартынов, М. В. Защита дальнего резервирования маломощных ответвительных подстанций [Текст] / М. В. Мартынов, И. Д. Кочетов, А. Н. Маслов, И. Ю. Никонов // Релейщик. – 2020. – № 1. – С. 14 – 18.
4. Fikri, M. New algorithm for distance protection of high voltage transmission lines [Text] / M. Fikri, M. El-Sayed // IEEE Proc. – 1988. – V. 135. – No 5. – P. 436 – 440.
5. Кочетов, И. Д. Распознавающая способность локальных токов при двухстороннем наблюдении линии электропередачи [Текст] / И. Д. Кочетов, Ю. Я. Лямец, Ф. А. Макашкин // Электрические станции. – 2020. – № 6. – С. 54 – 58.
6. Лямец, Ю. Я. Интервальные критерии распознавания места короткого замыкания [Текст] / Ю. Я. Лямец, М. В. Мартынов, А. Н. Маслов // Электричество. – 2019. – № 11. – С. 33 – 39.