

## РАСПОЗНАВАНИЕ ПОВРЕЖДЕННОГО ОТВЕТВЛЕНИЯ ПРИ ОДНОСТОРОННЕМ НАБЛЮДЕНИИ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

**Лямец Ю.Я.**, ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия. E-mail: yu.ya.liamets@gmail.com.

**Никонов И.Ю.**, ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия. E-mail: ivan04031997@gmail.com.

***Аннотация:** релейная защита линии электропередачи не располагает информацией о состоянии ответвлений, однако на нее возлагается функция дальнего резервирования собственной защиты ответвлений. В задачу наблюдателя, находящегося в начале линии, входит распознавание повреждения на стороне низшего напряжения ответвительной подстанции. Рассматриваемый метод распознавания поврежденного ответвления основан на подборе подходящего замера и представлении замера в виде двух функций – априорной и текущей.*

***Ключевые слова:** линия электропередачи, ответвления, короткое замыкание, распознавание.*

### **Введение**

Релейная защита линии электропередачи не располагает информацией о состоянии ответвлений. Тем не менее, на нее возлагается функция дальнего резервирования собственной защиты ответвлений [1-4]. В задачу наблюдателя, находящегося в начале линии, входит распознавание повреждения на стороне низшего напряжения ответвительной подстанции, при том, что их может быть несколько. Важно установить, что повреждено одно из ответвлений, но затем важно установить какое именно. Очевидно, что это не всегда представляется возможным: например, не всегда удастся различить ответвления одновременно близкие по мощности и по месту расположения. Тем очевиднее, что алгоритм, принципиально способный выявить поврежденное ответвление, решает задачу дальнего резервирования эффективнее, чем алгоритмы, не обладающие такой способностью. Рассматриваемый метод распознавания поврежденного ответвления основан на следующих принципиальных положениях: подборе подходящего замера в

виде отношения напряжения текущего режима к аварийной составляющей и представление замера в виде двух функций – априорной и текущей.

**Построение двух годографов – априорного и текущего**

Предположим, что в линии повреждено  $i$ -ое ответвление и  $\underline{A}_{if}$  - матрица прямой передачи, моделирующая ответвление как трехполюсник от входа в ответвление с координатой  $x_i$  до места КЗ  $f$  с переходным сопротивлением  $R_f$  (рис. 1). В текущем режиме КЗ трехполюсник преобразует напряжение ответвления  $\underline{U}_{i\text{тк}}$  в ток  $\underline{I}_f$  в месте КЗ

$$\underline{I}_f = \frac{\underline{U}_{i\text{тк}}}{\underline{A}_{if} R_f + \underline{B}_{if}} . \quad (1)$$

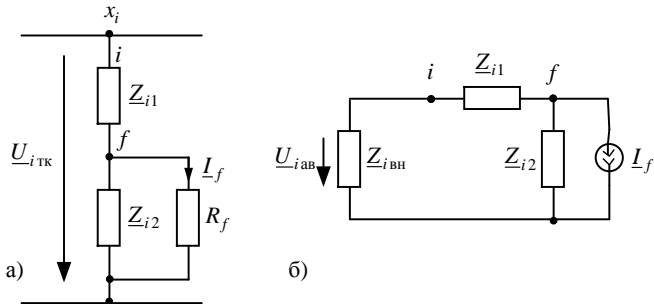


Рис. 1. Трехэлементная модель поврежденного ответвления  
 а – в текущем режиме, б – в чисто аварийном режиме

Электрическая сеть как эквивалентный генератор относительно  $i$ -го ответвления характеризуется ЭДС  $\underline{E}_i$  и внутренним сопротивлением  $\underline{Z}_{i\text{вн}}$ . Важную роль играет в информационном плане искусственный чисто аварийный режим, создаваемый в пассивной структуре электрической сети источником тока КЗ  $\underline{I}_f$ . Трехполюсник ответвления при этом переходит в состояние обратной передачи с нагрузкой  $\underline{Z}_{i\text{вн}}$ , на

которой создается аварийная составляющая текущего напряжения

$$\underline{U}_{iав} = -\frac{\underline{Z}_{iвн} \underline{I}_f}{\underline{C}_{if} \underline{Z}_{iвн} + \underline{A}_{if}} . \quad (2)$$

Еще одной его составляющей является напряжение предшествующего режима.

$$\underline{U}_{iтк} = \underline{U}_{iпд} + \underline{U}_{iав} . \quad (3)$$

Отношение текущего напряжения к аварийной составляющей, определяемое из (1) и (2), является линейной функцией сопротивления  $R_f$  и не зависит от тока КЗ  $\underline{I}_f$

$$\underline{K}_i = \underline{K}_{i0} + \underline{Y}_i R_f . \quad (4)$$

Зависимость (4) представляет собой линейный годограф в виде луча, исходящего на плоскости  $\underline{K}$  из точки  $\underline{K}_{i0}$ . Применительно к трехэлементной модели ответвления (рис. 1) и, исходя из предположения, что модуль сопротивления  $\underline{Z}_{i2}$ , шунтируемого переходным сопротивлением  $R_f$ , намного больше этого сопротивления ( $\underline{Z}_{i2} \rightarrow \infty$ ), получаем предельно простое описание годографа (4)

$$\underline{K}_i = -\left(1/\underline{Z}_{iвн}\right)\left(\underline{Z}_{i1} + R_f\right), \quad (5)$$

которое дает наглядное представление о влиянии сопротивлений  $\underline{Z}_{iвн} = Z_{iвн} \angle \varphi_{iвн}$ ,  $\underline{Z}_{i1} = Z_{i1} \angle \varphi_{i1}$  на отображение комплекса  $\underline{K}_i = K_i \angle \varphi_i$ . Из (5) следует, что годограф ответвления допускает обобщенное описание

$$\underline{K}_i(\rho) = \underline{K}_{i0} + \rho_i e^{j(\pi - \varphi_{iвн})}, \quad (6)$$

где  $\rho_i = R_f / \underline{Z}_{iвн} \geq 0$  - вещественный варьируемый параметр, учитывающий не только вариации переходного сопротивления, но и возможные изменения внутреннего сопротивления сети.

Годографы ответвлений  $\underline{K}_i(\rho_i)$ , отображающие множество возможных режимов коротких замыканий в ответвлениях на стороне низшего напряжения, служат общей характеристикой электропередачи. Они должны быть получены на этапе

обучения наблюдателя. Процедура распознавания конкретной ситуации на действующем объекте основывается на априорной информации о нем в виде его алгоритмической модели и годографов ответвлений, а также на результатах наблюдения конкретной ситуации в предшествующем и текущем режимах. Зафиксированные напряжения и токи  $\underline{U}_{\text{пд}}(0)$ ,  $\underline{I}_{\text{пд}}(0)$ ,  $\underline{U}_{\text{тк}}(0)$ ,  $\underline{I}_{\text{тк}}(0)$  преобразуются в алгоритмические величины — напряжения  $\underline{U}_{\text{пд}}^{\text{ал}}(x)$ ,  $\underline{U}_{\text{тк}}^{\text{ал}}(x)$ ,  $x=0\dots l$ , где  $l$  - длина линии.

$$\underline{U}_{\text{тк}}^{\text{ал}}(x) = \underline{A}_{\text{тк}}^{\text{ал}}(x)\underline{U}_{\text{тк}}(0) + \underline{B}_{\text{тк}}^{\text{ал}}(x)\underline{I}_{\text{тк}}(0), \quad (7)$$

$$\underline{U}_{\text{ав}}^{\text{ал}}(x) = \underline{A}_{\text{ав}}^{\text{ал}}(x)\underline{U}_{\text{ав}}(0) + \underline{B}_{\text{ав}}^{\text{ал}}(x)\underline{I}_{\text{ав}}(0). \quad (8)$$

Из напряжений (7), (8) формируется итоговая алгоритмическая функция – координатный годограф

$$\underline{K}^{\text{ал}}(x) = \frac{\underline{U}_{\text{тк}}^{\text{ал}}(x)}{\underline{U}_{\text{ав}}^{\text{ал}}(x)}, \quad (9)$$

который занимает свое место на плоскости  $\underline{K}$  (рис. 2), где предварительно были размещены годографы всех  $n$  ответвлений в ситуации, когда повреждено какое-либо из них. Какое - должны показать точки пересечения координатного годографа с годографами ответвлений:

$$\underline{K}^{\text{ал}}(x) = \underline{K}_i(\rho_i) \Rightarrow \hat{x}_i, \hat{\rho}_i, \quad (10)$$

$$i = \overline{1, n}.$$

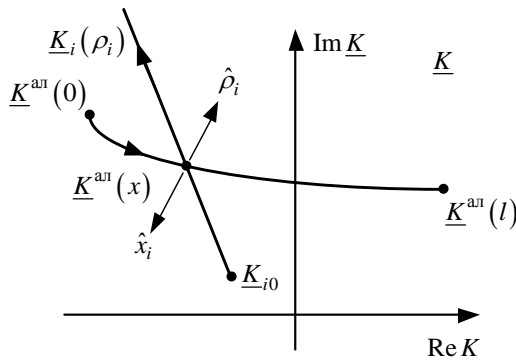


Рис. 2. Пересечение координатного годографа с годографом повреждения, относящимся к  $i$ -ому ответвлению

Оценку  $\hat{x}_i$  определяет координатный годограф, а оценку  $\hat{\rho}_i$  - годограф  $i$ -го ответвления. При благоприятном стечении обстоятельств задача распознавания поврежденного ответвления получает однозначное решение, о чем свидетельствует близость одной из оценок  $\hat{x}_k$  к координате  $x_k$   $k$ -го ответвления. В менее благоприятной ситуации, когда необходимо сделать выбор между двумя номерами  $i$  и  $k$ , можно учесть значения  $\hat{\rho}_i$  и  $\hat{\rho}_k$ , отдавая предпочтение номеру с меньшим, и поэтому более вероятным, значением  $\hat{\rho}$ .

### **Заключение**

Описанный подход к распознаванию поврежденного ответвления линии электропередачи подводит к общей концепции разделения информационной базы наблюдателя на две части – априорной, обрабатываемой заранее, и текущей, собираемой в процессе наблюдения. Обе преобразуются в специально подобранный замер, но по-разному. Априорная информация определяет его как функцию параметра КЗ в некоторых местах линии, а текущая информация – как функцию координаты места предполагаемого КЗ. Критерий распознавания КЗ устанавливается совпадением первой и второй функций при условии равенства координаты места привязки первой и аргумента второй. Наглядную интерпретацию этих функций дают годограф места КЗ и координатный годограф.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Нагай В.И.* Релейная защита ответвительных подстанций электрических сетей. – М.: Энергоатомиздат, 2002.
2. *Лямец Ю.Я., Мартынов М.В., Маслов А.Н.* Интервальные критерии распознавания места короткого замыкания в энергосистеме // *Электричество*. 2019. № 11. С. 33–39.
3. *Лямец Ю.Я., Воронов П.И., Мартынов М.В., Антишкин А.Б., Широкин М.Ю.* Модель неповреждённого энергообъекта как индикатор повреждения // *Электротехника*. 2017. № 7. С. 60–65.

4. *Fikri M., El-Sayed M.* New algorithm for distance protection of high voltage transmission lines // IEE Proc. 1988. V. 135, № 5. С. 436–440.

*Авторы:*

**Лямец Юрий Яковлевич**, ООО «Релематика»/ЧГУ им. И.Н. Ульянова, председатель НТС, окончил в 1962 г. энергетический факультет Новочеркасского политехнического института (НПИ). В 1994 г. защитил во ВНИИЭ докторскую диссертацию на тему «Адаптивные реле: теория и приложение к задачам релейной защиты и автоматики электрических систем», e-mail [yu.ya.liamets@gmail.com](mailto:yu.ya.liamets@gmail.com).

**Никонов Иван Юрьевич**, ООО «Релематика»/ЧГУ им. И.Н. Ульянова, инженер-исследователь, окончил в 2019 г. факультет Энергетики и Электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получил степень бакалавра по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», e-mail: [ivan04031997@gmail.com](mailto:ivan04031997@gmail.com).