

4. Shekhar S., Xiong H. Artificial Neural Network. In: Shekhar S., Xiong H. (eds) Encyclopedia of GIS. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-0-387-35973-1_72.

Авторы:

Золотов Александр Артурович, инженер департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», магистрант ЧГУ им. И.Н. Ульянова по направлению «Автоматика энергосистем». Окончил в 2020 году факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получил степень бакалавра по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». E-mail: zolotov_aa@ekra.ru.

Петряшин Илья Евгеньевич, техник департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», студент 4 курса бакалавриата ЧГУ им. И.Н. Ульянова по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». E-mail: petryashin.i.e@mail.ru.

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ОБЪЕКТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И КРИВОЙ АБСОЛЮТНОЙ НЕРАСПОЗНАВАЕМОСТИ ЗАЩИЩАЕМОГО ОБЪЕКТА

Дементий Ю.А., Иванов В.А., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия

Аннотация. В данной работе предложен метод построения объектной характеристики релейной защиты и кривой абсолютной нераспознаваемости защищаемого объекта, основанный на решении оптимизационной задачи. Составлена оптимизируемая функция, основанная на определении явления абсолютной нераспознаваемости. Приведён пример построения кривой абсолютной нераспознаваемости воздушной линии электропередач с двухсторонним питанием, наблюдаемой с одной стороны.

Ключевые слова: релейная защита, объектная характеристика, кривая абсолютной нераспознаваемости, оптимизируемая функция.

Селективность и чувствительность являются важными свойствами релейной защиты. Под селективностью релейной защиты понимается её способность срабатывать при коротких замыканиях в пределах защищаемой зоны (α -режимы) и не сра-

батывать при коротких замыканиях вне защищаемой зоны и нормальных режимах (β -режимы) [1].

Одним из методов оценки чувствительности релейной защиты является характеристика чувствительности к переходному сопротивлению (объектная характеристика). Работы [1, 2, 3], в которых упоминается объектная характеристика не содержат описания метода её построения. Поэтому в данной работе представлен метод построения объектной характеристики, а также кривой абсолютной нераспознаваемости, которая отражает физический предел распознавания контролируемых режимов в рассматриваемом объекте.

Описание метода построения

Согласно информационной теории релейной защиты одним из источников информации о режимах работы является имитационная модель объекта [3]. Модель принимает на вход n -мерный вектор объектных параметров $x \in G$ и возвращает вектор значений наблюдаемой величины (замер) $v \in S$, где G – область определения имитационной модели, где S – образ отображения F (уставочная область), F – преобразование, объединяющее функцию имитационной модели и функцию замера.

Конкретный режим задается вектором x_α или вектором x_β объектных параметров. Преобразование векторов x_α и x_β в вектора v_α и v_β осуществляется преобразованиями F_α и F_β :

$$v_\alpha = F_\alpha(x_\alpha), v_\beta = F_\beta(x_\beta).$$

Преобразования F_α и F_β отображают области G_α и G_β в уставочные области $S_\alpha = F_\alpha(G_\alpha)$ и $S_\beta = F_\beta(G_\beta)$ [4]. В общем случае уставочные области S_α и S_β могут пересекаться. Поскольку в области пересечения нельзя точно установить к какому режиму относится замер, во всех режимах, замеры которых расположены в области пересечения, защите запрещено срабатывать. Так, пересечение образов отображений α - и β -режимов приводит к явлению абсолютной нераспознаваемости, математическое определение которого выглядит следующим образом:

$$F_\alpha(x_\alpha) = F_\beta(x_\beta), \quad (1)$$

Область S_α можно условно разделить на область срабатывания $S_{\alpha\alpha}$ и область пересечения $S_{\alpha\beta}$. Прообразами уставочных об-

ластей $S_{\alpha\alpha}$ и $S_{\alpha\beta}$ в объектном пространстве являются области $G_{\alpha\alpha}$ и $G_{\alpha\beta}$. Проекция области $G_{\alpha\alpha}$ на плоскость $x_{f\alpha}$, $R_{f\alpha}$ окаймляется кривой абсолютной нераспознаваемости. Таким образом, кривая абсолютной нераспознаваемости является граничной линией между проекциями областей $G_{\alpha\alpha}$ и $G_{\alpha\beta}$ на плоскость $x_{f\alpha}$, $R_{f\alpha}$.

Кривая абсолютной нераспознаваемости представляет собой зависимость предельного значения переходного сопротивления $R_{f\alpha}$, до которого распознавание теоретически возможно, от координаты места замыкания $x_{f\alpha}$. Построение кривой нераспознаваемости осуществляет процедура минимизации

$$R_{f\alpha}(x_{f\alpha}) = \min_{x_{norm} \in G_{\alpha}} R_{f\alpha}(x_{f\alpha}, x_{norm}), \quad (2)$$

где x_{norm} – вектор нормальных объектных параметров.

Объектная характеристика представляет собой зависимость минимального переходного сопротивления $R_{f\alpha}$, которое гарантированно может распознать орган РЗ, от координаты места замыкания $x_{f\alpha}$ [1]. Построение объектной характеристики осуществляет процедура минимизации (2) при выполнении условия срабатывания защиты.

В данной работе объектная характеристика и кривая абсолютной нераспознаваемости представляют собой набор точек с фиксированным параметром $x_{f\alpha}$, для которых осуществляется поиск оптимальных значений $R_{f\alpha}$. Для их построения необходимо разграничить области $G_{\alpha\alpha}$ и $G_{\alpha\beta}$. На основании математического определения абсолютной нераспознаваемости (1) решением такой задачи будет являться результат минимизации нормы разности векторов замеров:

$$\left| F_{\alpha}(x_{\alpha}) - F_{\beta}(x_{\beta}) \right| \rightarrow \min_{\substack{x_{\alpha} \in G_{\alpha} \\ x_{\beta} \in G_{\beta}}}, \quad (3)$$

Необходимо отметить, что условие (3) будет выполняться как для граничных режимов, так и для тех режимов, что расположены внутри области $G_{\alpha\beta}$, что является нежелательным. Поэтому задачу оптимизации необходимо изменить, добавив дополнительное требование к условию (3), ограничивающее выполнение решения в области нераспознаваемости. В качестве дополнительного требования к задаче служит минимизация переходного сопротивления α -режима:

$$R_{f\alpha} \rightarrow \min_{x_{\alpha} \in G_{\alpha}}, \quad (4)$$

На основании условий (3) и (4) составляется оптимизируемая функция. Однако величины, фигурирующие в задаче, могут отличаться друг от друга на несколько порядков.

Для равномерного влияния условий (3) и (4) на процедуру оптимизации к условию (3) добавляется дополнительное ограничение в виде гиперпараметра λ [5]. Чтобы добиться равномерного влияния условий на процедуру оптимизации необходимо подобрать гиперпараметр. В результате, оптимизируемая функция выглядит следующим образом:

$$f([x_{\alpha}, x_{\beta}]) = \lambda \left| F_{\alpha}(x_{\alpha}) - F_{\beta}(x_{\beta}) \right| + R_{f\alpha}, \quad (5)$$

где λ – параметр регуляризации.

Таким образом, решением задачи построения кривой абсолютной нераспознаваемости является минимизация функции (5):

$$f([x_{\alpha}, x_{\beta}]) \rightarrow \min_{\substack{x_{\alpha} \in G_{\alpha} \\ x_{\beta} \in G_{\beta}}}, \quad (6)$$

Так как объектная характеристика – это характеристика защиты, то для её построения недостаточно наличия только условия (6), необходимо также указать условие срабатывания защиты:

$$TC = True, \quad (7)$$

где TC – trigger condition (условие срабатывания).

Следовательно, решением задачи построения объектной характеристики является минимизация функции (5) при выполнении условия срабатывания защиты (7):

$$f([x_{\alpha}, x_{\beta}] | TC = True) \rightarrow \min_{\substack{x_{\alpha} \in G_{\alpha} \\ x_{\beta} \in G_{\beta}}}, \quad (8)$$

В данной работе применяется градиентный метод оптимизации, одним из требований которого является задание начального приближения параметров оптимизации. Для поиска глобального минимума функции необходимо задать начальное приближение параметров таким образом, чтобы оно не оказалось в окрестности локального минимума.

На основании вышеизложенного, требованием данного метода построения является задание начального приближения объектных параметров.

Поиск оптимальных значений объектных параметров имеет итеративный характер. В первую очередь формируется начальное приближение объектных параметров для α - и β - режимов в виде конкатенированного вектора:

$$\mathbf{x}_{concat} = [\mathbf{x}_\alpha, \mathbf{x}_\beta].$$

При этом конкатенированный вектор содержит константное значение параметра x_{fa} , которое не изменяется во время процедуры оптимизации. Оптимизация происходит до тех пор, пока не будет выполнено условие (6) для построения кривой абсолютной нераспознаваемости, или условие (8) для построения объектной характеристики. После получения оптимальных значений объектных параметров отбирается значение параметра R_{fa} .

Затем описанный процесс повторяется снова для равномерно разнесённых значений x_{fa} , взятых с определённым шагом. После получения оптимальных значений параметров R_{fa} строится объектная характеристика или кривая абсолютной нераспознаваемости.

Построение кривой абсолютной нераспознаваемости

На рис. 1 приведена модель воздушной линии с двухсторонним питанием, наблюдаемой с одной стороны, в режиме трехфазного короткого замыкания.

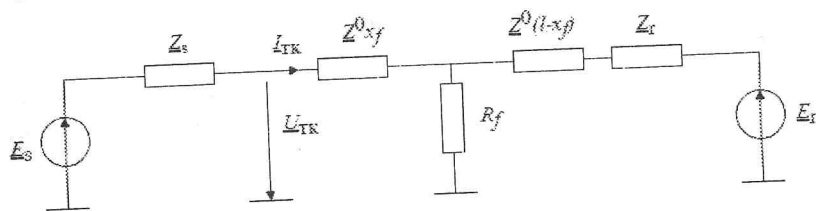


Рис. 1. Схема замещения воздушной линии электропередач

В табл. 1 и табл. 2 приведены значения фиксированных и варьируемых объектных параметров модели.

В качестве замера для данной модели выбрана величина проводимости:

$$\underline{Y} = \underline{I}_{TK} / \underline{U}_{TK}.$$

В таком случае двумерный вектор проводимости представлен на комплексной плоскости:

$$\mathbf{y} = [\text{Real}(\underline{Y}), \text{Imag}(\underline{Y})].$$

Таблица 2

Фиксированные параметры защищаемого объекта

Фиксированные параметры	Обозначение параметра	Значение параметра
Номинальное напряжение, кВ	U	110
Удельное сопротивление линии, Ом/км	\underline{Z}^0	0.1+j0.4
Длина линии, км	l	100
Длина защищаемой зоны, км	x_z	80

Таблица 3

Варьируемые параметры защищаемого объекта

Варьируемые параметры	Обозначение параметра	Диапазон изменения параметра
Угол передачи, град	δ	-30...30
Модуль сопротивления систем, Ом	Z_s, Z_r	0.1...100
Аргумент сопротивления систем, град	$\arg(Z_s), \arg(Z_r)$	80...90
Переходное сопротивление, Ом	R_f	0...1e4
Расстояние до места повреждения, км	x_f	0...100

На рис. 2 приведена кривая абсолютной нераспознаваемости защищаемого объекта (рис. 1).

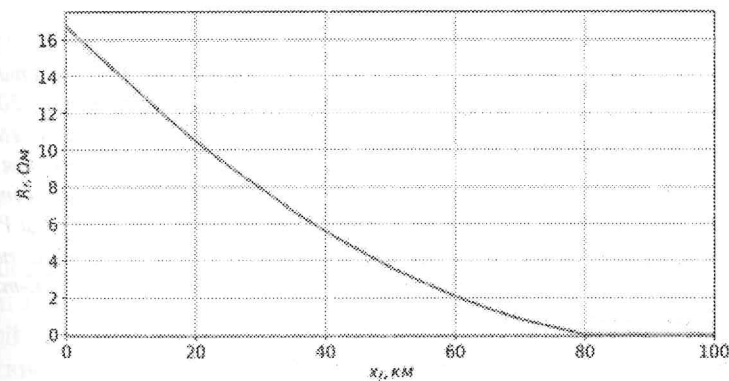


Рис. 2. Кривая абсолютной нераспознаваемости

Выводы

1. Предложен метод построения кривой абсолютной нераспознаваемости и объектной характеристики, основанный на решении оптимизационной задачи.
2. Предлагаемый метод применен для построения кривой абсолютной нераспознаваемости воздушной линии электропередачи с двухсторонним питанием, наблюдаемой с одной стороны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мартынов М.В. Исследование и разработка обучаемых модулей микропроцессорных защит линий электропередачи: дис. ... к-та техн. наук. Чуваш. гос. университет, Чебоксары, 2014.
2. Романов Ю.В. Проблема оценки чувствительности релейной защиты / Ю.В. Романов, П.И. Воронов // Электрические станции. – 2017. – № 10(1035). – С. 38-41.
3. Лямец Ю.Я. Граничные задачи в информационной теории релейной защиты / Ю.Я. Лямец, Г.С. Нудельман, Ю.В. Романов [и др.] // Электротехника. – 2011. – № 1. – С. 13-18.
4. Лямец Ю.Я. Граничные режимы в методике обучения релейной защиты. Часть 1. граничные условия и обучающие процедуры / Ю.Я. Лямец, Д.В. Кержаев, Г.С. Нудельман, Ю.В. Романов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2009. – № 4. – С. 24-30.
5. Wolpert, D.H., Macready, W.G. No Free Lunch Theorems for Optimization // IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.1, No.1, – 1997 – p. 67-82.

Авторы:

Дементий Юрий Анатольевич, кандидат технических наук, руководитель группы ООО «Релематика». Окончил электроэнергетический факультет Вологодского государственного университета в 2015 году. В 2018 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Методы и средства компенсации полного тока однофазного замыкания на землю в распределительных сетях». E-mail: dementiy.yu.a@gmail.com.

Иванов Василий Александрович, студент кафедры ТОЭ и РЗА Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, техник-исследователь ООО «Релематика». E-mail: ivanov.vasili.alek@gmail.com.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ КАК АКТИВНО-АДАПТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Пилюгин Г.А., Пантелеев В.И., Филатов А.Н., Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Аннотация: В работе решается задача моделирования синхронного двигателя как активно-адаптивного элемента системы электроснабжения промышленного предприятия, и исследуются адаптивные свойства с целью разработки структур и алгоритмов оптимального управления состоянием синхронного двигателя.

Ключевые слова: синхронный двигатель, активно-адаптивный элемент, система электроснабжения, реактивная мощность, ток, напряжение.

Согласно основным положениям концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью, представляющую собой совокупность подключенным к генерирующим источником и потребителям электроэнергии элементов электрических сетей и систем управления, включает в себя устройства электромагнитного преобразования электроэнергии с широкими возможностями регулирования параметров (напряжения, реактивной мощности, потерь электроэнергии) [1].

Система электроснабжения промышленного предприятия (СЭПП) является частью (подсистемой) энергосистемы. Входящие в ее состав активно-адаптивные элементы, по аналогии с энергосистемой, являются синхронные двигатели (СД), которые участвуют в технологическом процессе предприятия и могут быть использованы как устройства компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения в узлах электрических нагрузок.

СД представляет собой электромашиное устройства, работающее с постоянной частотой вращения зависящей от частоты питающей сети и количества пар полюсов. Генерация реактивной мощности зависит от нескольких управляющих воздействий, а именно регулирование тока возбуждения (ток ротора) и изменение напряжения питающей сети СД [2, 3].