

Распознавание аварийных состояний энергообъекта посредством локализации альтернативных режимов

ЛЯМЕЦ Ю.Я., ВОРОНОВ П.И., АТНИШКИН А.Б.

Множество режимов электрической системы, в состав которой входит защищаемый энергообъект, разделено на подмножество режимов, обусловленных повреждением объекта, и остающееся подмножество альтернативных режимов. Задача распознавания режимов первого подмножества решается с помощью процедуры локализации противостоящего ему второго подмножества. Инструментом локализации служит алгоритмическая модель неповреждённого энергообъекта, адекватная ему в альтернативных режимах и неадекватная в случае его повреждения. Такая модель преобразует текущую и априорную информацию об энергообъекте в двухкоординатные замеры – функции времени или комплексы, отображаемые на своих плоскостях, возможно, с добавлением оси времени. Режимы разных подмножеств отображаются по-разному, что создаёт благоприятные возможности для распознавания повреждений энергообъекта. В качестве примера рассмотрены два энергообъекта – трансформатор и линия электропередачи. Для защиты трансформатора важна задача разграничения витковых замыканий в обмотке и внешних коротких замыканий. Для односторонне наблюдаемой линии электропередачи важно обеспечение высокой чувствительности к замыканиям в защищаемой зоне при гарантированной отстройке от замыканий вне зоны.

Ключевые слова: энергообъект, распознавание, режим, короткое замыкание, релейная защита, локализация

В недавнее время наметился и явно начал нарастать интерес к такому построению релейной защиты, которое делает её унифицированной (setting-less [1]) и к тому же самонастраивающейся (corrective [2]). Вообще говоря, концепция не нова. Так, она отчётливо просматривается в хорошо известном реле Бреслера [3] – родоначальнике класса многофазных реле. Но если прежде её реализации носили эвристический характер, то ныне оказалось возможным построить её на основе метода алгоритмических моделей [4, 5]. Характерной чертой этого метода является названное локализацией обособление режимов, альтернативных тем, на которые призвана реагировать релейная защита. Имеются приложения метода [6–9], заблаговременно подготовлен понятийный аппарат [10], однако ощущается необходимость в обобщении и развитии существующих представлений, начиная с обсуждения принципиальных различий между двумя типами моделей энергообъекта – алгоритмической и имитационной.

Имитационная модель охватывает не только защищаемый объект, но и остальную часть системы и воспроизводит режимы системы. Алгоритмическая модель относится исключительно к объекту, и её задача – преобразовать наблюдаемые величины в замеры релейной защиты. Иначе говоря, алгоритмическая модель является преобразователем сигналов в структуре релейной защиты. Алгоритмическая модель неповреждённого объекта адекватна

ему в альтернативных режимах и неадекватна в его аварийных режимах. Именно в этом можно усмотреть физические основы локализации альтернативных режимов, разграничения режимов разного типа и, как следствие, распознавания контролируемых режимов.

Формирование замеров. Алгоритмическая модель активируется наблюдаемыми величинами. Пусть \mathbf{i} и \mathbf{u} – n -мерные векторы токов и напряжений; \mathbf{i}_s , \mathbf{u}_s – векторы наблюдаемых величин; s – символ места наблюдения. Общий подход к формированию замеров возможен при условии, что реакция алгоритмической модели на воздействие только напряжения \mathbf{u}_s (или только тока \mathbf{i}_s) близка к наблюдаемому току \mathbf{i}_s (или напряжению \mathbf{u}_s). У близких функций близки и приращения во времени от начального момента t_H до текущего момента t : $\Delta \mathbf{i}(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}(t_H)$, $\Delta \mathbf{u}(t) = \mathbf{u}(t) - \mathbf{u}(t_H)$. В качестве t_H может быть принят момент смены наблюдаемых режимов t_0 , что подходит для нарастающего окна наблюдения, либо $t_H = t - \Delta t$, где Δt – фиксированный интервал времени, что естественно для текущего окна наблюдения. Пусть $v_1(t)$ и $v_2(t)$ – обозначение сравниваемых величин как токов или напряжений, так и их приращений, $v_k(t)$, $k = \overline{1, n}$, – k -й элемент n -мерного вектора $v(t)$. Сравнение совершается на окне наблюдения $\xi \in (t_H, t)$. Для сопоставления функций $v_{1k}(t)$ и $v_{2k}(t)$ сформируем двухкоординатный замер:

$$\mathbf{z}_k(t) = [\hat{\lambda}_k(t), \sigma_k(t)]^T,$$

где $\hat{\lambda}_k(t)$ — оценка множителя $\lambda_k(t)$ в целевой функции, составленной по методу наименьших квадратов:

$$\sigma_k^2(t) = \int_{t_H}^t (v_{1k}(\xi) - \lambda(t)v_{2k}(\xi))^2 d\xi \rightarrow \min, \quad (1)$$

откуда

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\int_{t_H}^t v_{1k}(\xi)v_{2k}(\xi)d\xi}{\int_{t_H}^t v_{2k}^2(\xi)d\xi}, \quad (2)$$

а $\sigma_k(t)$ — невязка функций $v_{1k}(\xi)$ и $v_{2k}(\xi)$:

$$\sigma_k(t) = \frac{1}{t - t_H} \int_{t_H}^t (v_{1k}(\xi) - \hat{\lambda}_k(t)v_{2k}(\xi))d\xi. \quad (3)$$

Изменяющийся во времени замер $\mathbf{z}_k(t)$ описывает годограф в трёхмерном пространстве с координатами $\hat{\lambda}_k, \sigma_k, t$. Если предположить, что алгоритмическая модель не отличается от той части имитационной модели электрической системы, которая представляет защищаемый объект, то тем самым будут созданы идеальные условия для локализации альтернативных режимов. Годографы всех замеров, проводимых в этих режимах, отобразятся каждый на своей плоскости \mathbf{z}_k в единственную точку с координатами $\hat{\lambda}_k(t) \equiv 1, \sigma_k(t) \equiv 1$.

В общем случае алгоритмическая модель действует в базисе мгновенных токов и напряжений, в частном случае — в базисе комплексных величин. Соединение результатов наблюдения текущего и предшествующего режимов защищаемого объекта целесообразно всегда, но в первом случае просто необходимо для задания начальных условий, с которыми алгоритмическая модель входит в текущий режим. Величины предшествующего режима участвуют в формировании замеров непосредственно или же косвенным образом — через аварийные составляющие токов и напряжений.

Далее рассматриваются приложения метода локализации к защите трансформатора, когда используется базис мгновенных величин, и к защите линии электропередачи, функционирующей в базисе комплексных величин.

Трёхфазный двухобмоточный трансформатор с соединением обмоток «звезда с нулём—треугольник». По отношению к замыканиям в обмотках трансформатора альтернативными являются режимы

двух типов: первый — броски намагничивающего тока, второй — внешние короткие замыкания. Локализация альтернативных режимов первого типа рассмотрена ранее [4], здесь же рассматривается задача локализации режимов второго типа, а именно, междуфазные замыкания на выводах трансформатора за измерительными преобразователями тока. Локализация осуществляется для распознавания витковых замыканий в обмотках. Физический смысл задачи изменяется в связи с тем, что аварийные и альтернативные режимы на этот раз затрагивают разные части объекта: витковые замыкания — одну из фаз первичной обмотки, внешние замыкания — две фазы за пределами вторичной обмотки.

В качестве основы для построения алгоритмической модели трансформатора принята структурная схема по рис. 1. Наблюдаемые величины — токи и напряжения первичной обмотки i_{v1}, u_{v1} и токи на выводах вторичной обмотки i_{v3} (здесь $v = A, B, C$ — обозначение произвольной фазы). Помимо наблюдаемых величин на схеме показаны токи вторичных обмоток i_{v2} , первичные и вторичные напряжения намагничивания $u_{\mu v1}, u_{\mu v2}$. Алгоритмическая модель (рис. 2) условно разделена на две части; первая — для фазы v от входа первичной обмотки до ветви намагничивания вторичной обмотки с напряжением $u_{\mu v2}$. Структурная схема описывается уравнениями первичной обмотки

$$u_{\mu v1} = u_{v1} - R_1 i_{v1} - L_1 \frac{di_{v1}}{dt}; \quad (4)$$

взаимосвязью вторичных токов

$$i_{v3} = i_{v2} - i_{v-1,2}, \quad (5)$$

где $v-1$ — обозначение отстающей фазы; уравнениями магнитной цепи:

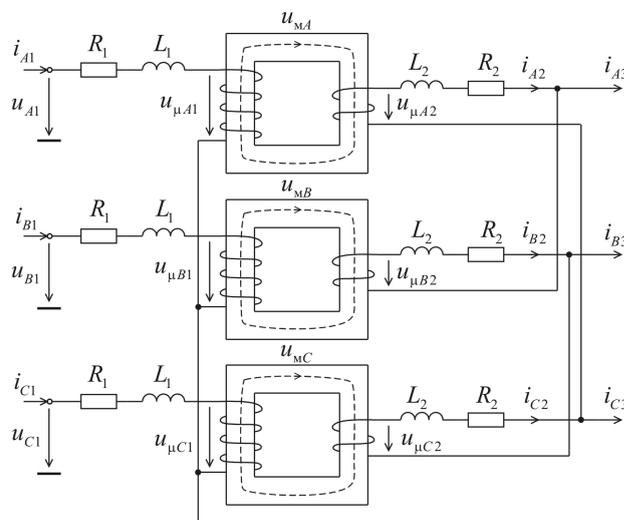


Рис. 1. Структурная схема трансформатора

$$u_{\mu v1} = \frac{d\Psi_{v1}}{dt}; \quad (6)$$

$$u_{\mu v2} = Ku_{\mu v1}; \quad (7)$$

$$i_{v1} - (1/K)i_{v2} = u_{\mu v1}, \quad (8)$$

где Ψ_{v1} – потокосцепление первичной обмотки, обусловленное основным потоком магнитопровода; K – коэффициент трансформации; $u_{\mu v1}$ – ток намагничивания, приведённый к первичной стороне; уравнением контурного тока треугольника обмоток

$$\begin{aligned} & \frac{di_{\text{конт}}}{dt} + \frac{1}{\tau_2} i_{\text{конт}} = \\ & = \frac{1}{3} \left[\frac{1}{L_2} \sum_{v=A,B,C} u_{\mu v2} - \frac{1}{\tau_2} (i_{A3} - i_{B3}) - \frac{d(i_{A3} - i_{B3})}{dt} \right], \end{aligned} \quad (9)$$

где $\tau_2 = L_2 / R_2$, и связью с ним токов отдельных обмоток:

$$i_{A2} = i_{\text{конт}} + i_{A3}; \quad (10)$$

$$i_{B2} = i_{\text{конт}}; \quad (11)$$

$$i_{C2} = i_{\text{конт}} - i_{B3}. \quad (12)$$

Какому типу наблюдения отвечает алгоритмическая модель, определяется подмоделью ветви намагничивания. Рассмотрим три варианта в порядке упрощения.

1. *Без привлечения априорной информации о ветви намагничивания.* В таком случае ветвь намагничивания интерпретируется как неопределённый элемент алгоритмической модели, следовательно, это случай достаточного наблюдения, не предоставляющий возможности оставить в резерве ни одну из наблюдаемых величин, но позволяющий, вместе с тем, сформировать три замера с использованием

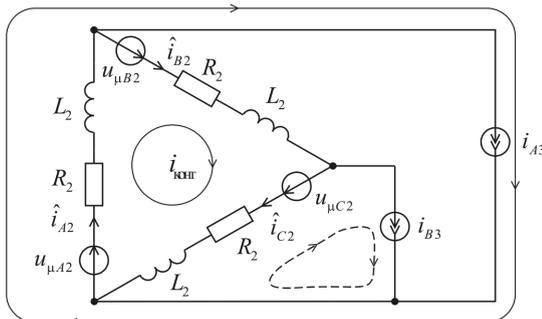
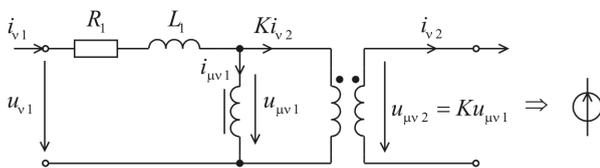


Рис. 2. Алгоритмическая модель трансформатора

всех закономерностей (4)–(12). Вектор замера имеет вид:

$$z_v(t) = [\Delta\Psi_{v1}(t), \Delta i_{\mu v1}(t)]^T, \quad (13)$$

где

$$\Delta\Psi_{v1}(t) = \int_{t-\Delta t}^t u_{\mu v1}(\xi) d\xi; \quad (14)$$

$$\Delta i_{\mu v1}(t) = i_{\mu v1}(t) - i_{\mu v1}(t - \Delta t). \quad (15)$$

Приращение потокосцепления определяется на основании соотношений (4) и (6); приращение тока намагничивания – по соотношению (8) после определения токов вторичных обмоток i_{v2} на основании соотношений (7), (9)–(12). Установлено, что замер (13)–(15) способствует разграничению витковых замыканий и бросков намагничивающего тока вследствие насыщения трансформатора [4].

2. *С моделью ветви намагничивания ненасыщенного трансформатора.* Индуктивность L_μ ветви намагничивания неизвестна. Наблюдение сохраняет свой характер, оставаясь достаточным, но замер (13) целесообразно заменить замером из сопоставления близких величин. На основании равенства (6) имеем для приращений

$$L_{\mu1} \Delta i_{\mu v1}(t) = \Delta\Psi_{v1}(t) \quad (16)$$

и соответствующий замер

$$z_v(t) = [\hat{L}_{\mu1}(t), \sigma(t)]^T, \quad (17)$$

где

$$\hat{L}_{\mu1}(t) = \frac{\int_{t_H}^t \Delta\Psi_{v1}(\xi) \Delta i_{\mu v1}(\xi) d\xi}{\int_{t_H}^t \Delta i_{\mu v1}^2(\xi) d\xi}; \quad (18)$$

$$\sigma(t) = \frac{1}{t - t_H} \int_{t_H}^t (\Delta\Psi_{v1}(\xi) - \hat{L}_{\mu1}(t) \Delta i_{\mu v1}(\xi)) d\xi. \quad (19)$$

3. *С задаваемой индуктивностью L_μ ,* когда приращение тока намагничивания определяется непосредственно из (14), (16):

$$\Delta i_{\mu v1}(t) = \frac{1}{L_{\mu1}} \int_{t-\Delta t}^t u_{\mu v1}(\xi) d\xi, \quad (20)$$

и наблюдение становится избыточным, так как имитационная модель приобретает способность определять приращения токов в треугольнике из соотношения (8) без обращения к контурному уравнению (9):

$$\Delta i_{v2}^{(1)}(t) = K(\Delta i_{v1}(t) - \Delta i_{\mu v1}(t)), \quad (21)$$

где верхний индекс свидетельствует о том, что преобразования совершаются без привлечения вторичных наблюдаемых токов i_{v3} . Приращение выходного тока определяется алгоритмической моделью на основании равенства (5):

$$\Delta i_{v3}^{(1)}(t) = \Delta i_{v2}^{(1)}(t) - \Delta i_{v-1,2}^{(1)}(t), \quad (22)$$

а замеры $z_v^{(1)}(t)$ формируются из пар приращений наблюдаемого тока $\Delta i_{v3}(t)$ и тока модели $\Delta i_{v3}^{(1)}(t)$ по алгоритму (2) и (3).

Возможность обойтись без уравнения (9) экономит вычислительные ресурсы релейной защиты, но вместе с тем имеет и оборотную сторону: недоиспользуется априорная информация, заключённая в алгоритмической модели. Отсюда следует целесообразность формирования наряду с замерами $z_v^{(1)}(t)$ ещё и замеров $z_v^{(2)}(t)$, получаемых также по алгоритму (2), (3), но на этот раз при сравнении приращений $\Delta i_{v2}^{(1)}(t)$ с $\Delta i_{v2}^{(2)}(t)$; последние определяются из уравнения (9) и равенств (10)–(12).

В частном случае данного варианта ток намагничивания вообще исключается из рассмотрения, т.е. принимается $L_\mu \rightarrow \infty$. Казалось бы, алгоритмическая модель предельно упрощается, но это касается всё той же ветви алгоритма, отмеченной верхним индексом «1», которая ограничивается связями (8) и (5) между токами, не привлекая не только априорную информацию в виде уравнений (4) и (9), но и часть текущей информации, заключённую в наблюдаемых напряжениях. Следовательно, и в данном случае целесообразно дополнительно сформировать замеры $z_v^{(2)}(t)$ определением токов $i_{v2}^{(2)}(t)$ с помощью соотношений (4), (9)–(12) и сравнения их с токами $i_{v2}^{(1)}(t) = (1/K)i_{v1}(t)$.

В приводимой далее иллюстрации метода применяются алгоритмические модели с $L_\mu \rightarrow \infty$ и $L_\mu = \text{const}$. Объект – трансформатор 110/35 кВ мощностью 63 МВА с параметрами обмоток: $R_1 = 0,408 \text{ Ом}$; $L_1 = 0,035 \text{ Гн}$; $R_2 = 0,137 \text{ Ом}$; $L_2 = 0,012 \text{ Гн}$. Данные значения предоставляются как имитационной, так и алгоритмической моделям. Ветвь намагничивания в имитационной модели представлена индуктивностью с кусочно-линейной вебер-амперной характеристикой, проходящей в первом квадранте через начало координат и две другие точки – 298,88 Вб; 2,236 А и 298,97 Вб; 4,473 А. Имитировались внешние и внутренние повреждения. Внешние – междуфазные короткие замыкания $K_{AB}^{(2)}$ на выводах вторичной обмотки через переходное сопротивление 5 Ом. Внутренние – витковые замыкания в первичной обмотке фазы В

через переходное сопротивление 0,1 Ом. Алгоритмические модели и формируемые в них замеры подобраны с таким расчётом, чтобы одни модели и замеры наилучшим образом учитывали специфику внешних замыканий, а другие – внутренних. В первой алгоритмической модели, ориентированной на внешние замыкания, ток намагничивания не учитывается ($L_\mu \rightarrow \infty$); в ней формируются замеры

$$z_{v,v-1}(t) = [\hat{\lambda}_{v,v-1}(t), \sigma_{v,v-1}(t)]^T, \quad (23)$$

интерпретируемые как линейные, так как определяются по разности фазных токов, модельных

$$\hat{i}_{v,v-1,3}(t) = \hat{i}_{v3}(t) - \hat{i}_{v-1,3}(t) \quad (24)$$

и наблюдаемых $i_{v3}(t)$, $i_{v-1,3}(t)$.

Во второй алгоритмической модели, ориентированной на витковые замыкания, ветвь намагничивания представлена индуктивностью $L_\mu = 133,7 \text{ Гн}$, совпадающей со значением индуктивности в имитационной модели на рабочем участке нелинейной характеристики намагничивания. Формируемые фазные замеры

$$z_v(t) = [\hat{\lambda}_v(t), \sigma_v(t)]^T \quad (25)$$

определяются на базе приращений токов первого типа $\Delta i_{v2}^{(1)}(t)$, определяемых как в (21), и приращений второго типа $\Delta i_{v2}^{(2)}(t)$, определяемых с привлечением контурного уравнения (9).

На рис. 3 приведены годографы замеров (23) и (25) при внешнем коротком замыкании и при замыкании в одном проценте витков первичной обмотки. В предшествующем режиме у трансформатора была номинальная нагрузка с $\cos \varphi = 0,85$. Момент замыкания $t_0 = 0$. Цифровая обработка наблюдаемых величин проводилась с частотой дискретизации 16 кГц на текущем окне наблюдения продолжительностью $\Delta t = 2 \text{ мс}$ при общем времени наблюдения 30 мс.

Обращают на себя внимание качественные различия в ходе годографов при внешнем (рис. 5, а, в, д, ж) и внутреннем замыканиях (рис. 5, б, г, е, з). Первые имеют плоскую форму, располагаясь по преимуществу в плоскости $\hat{\lambda} = 1$, вторые – винтообразные. Они по-разному ориентированы относительно прямой $\hat{\lambda} = 1, \sigma = 0$, на которой располагались бы годографы внешних замыканий при идеальной локализации. Казалось бы, первый замер (23) создаёт для этого необходимые условия, однако не все. Не учитывается ток намагничивания, присутствующий в имитационной модели, чем и объясняются имеющие место отклонения годографов внешних замыканий от идеальной линии. Тем не

менее, привязка годографов к этой линии очевидна. Подтверждается предположение, что годографы линейных замеров (рис. 5,а, в) превосходят годографы фазных замеров (рис. 5,д, ж) по степени локализации альтернативных режимов. Годографы виткового замыкания (рис. 5,б, г, е, з) отличаются

не только формой, но и масштабом изменения. Как и предполагалось, к замыканию витков в фазе В наиболее чувствителен замер $z_b(t)$ (рис. 5,з), годограф которого характеризуется наибольшим диапазоном изменений координаты $\hat{\lambda}_B$.

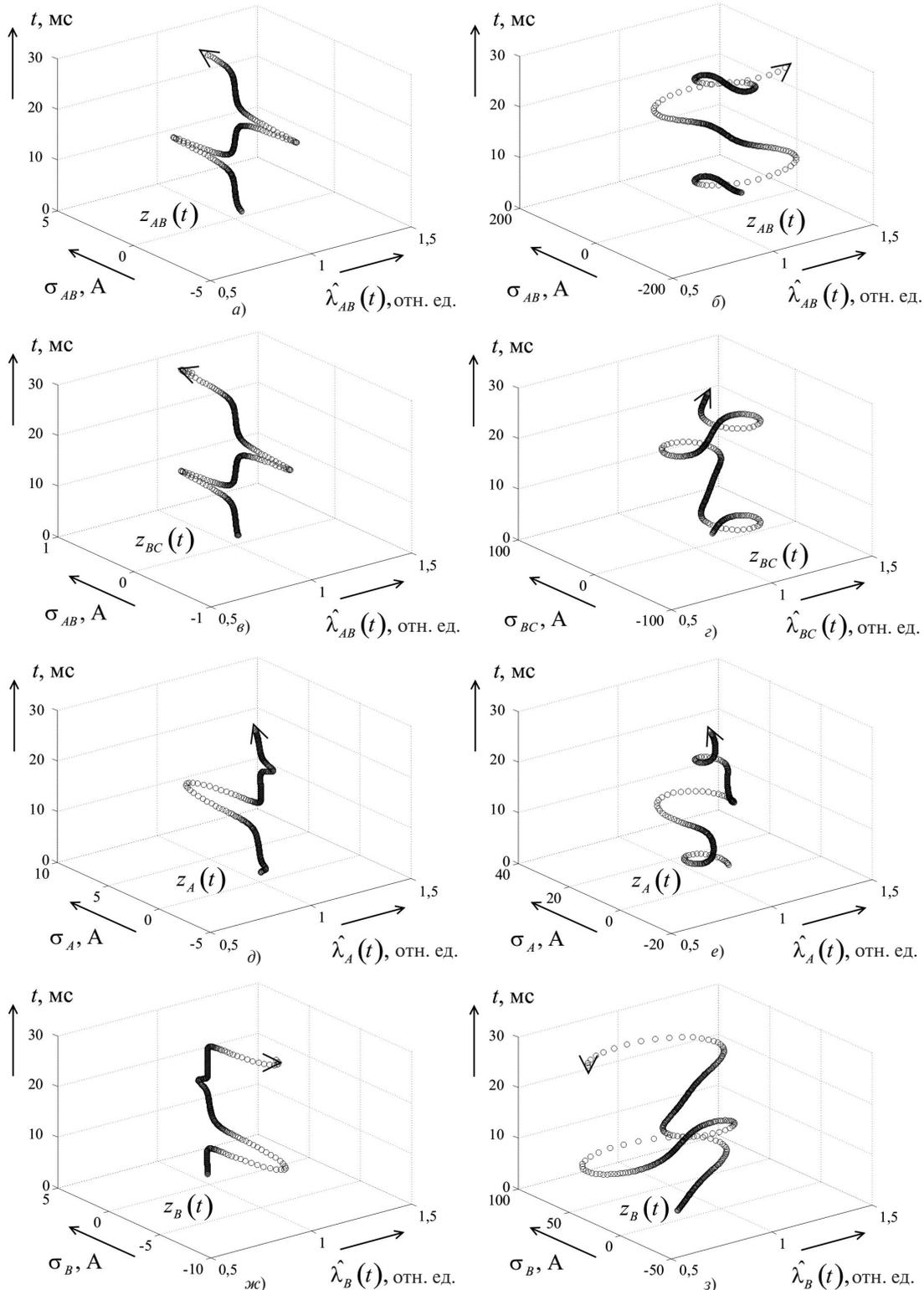


Рис. 3. Годографы замеров: а, в, д, ж – при внешнем замыкании $K_{AB}^{(2)}$; б, г, е, з – при витковом замыкании

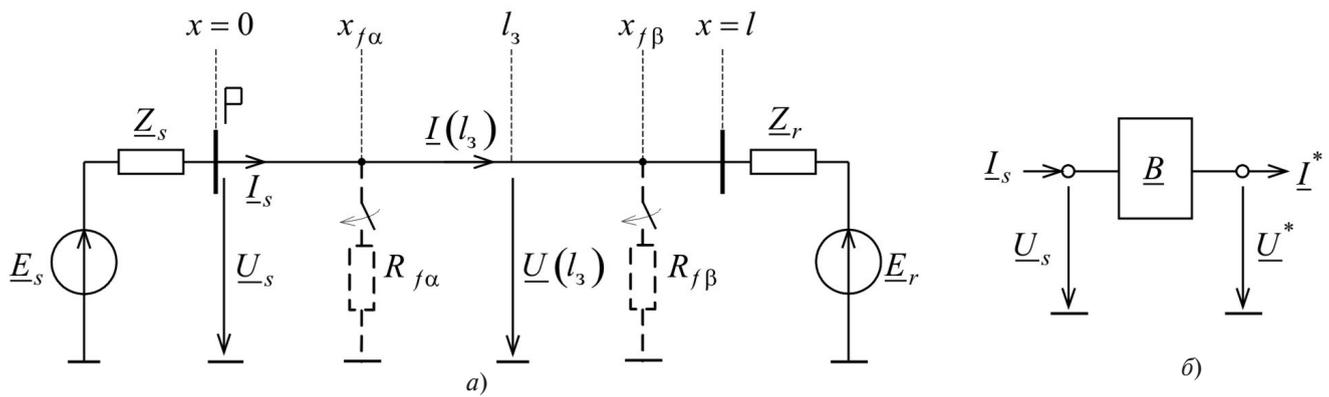


Рис. 4. Модели электропередачи: а – имитационная; б – алгоритмическая

Одностороннее наблюдение линии электропередачи. Защищаемый энергообъект – участок линии электропередачи протяжённостью l_3 . Электропередача представлена имитационной моделью (рис. 4,а). Алгоритмическая модель (рис. 4,б) преобразует комплексы наблюдаемых в начале линии тока и напряжения $\underline{I}_s, \underline{U}_s$ в выходные величины $\underline{I}^*, \underline{U}^*$ (отмечены звёздочкой во избежание путаницы с родственными величинами имитационной модели $\underline{I}(l_3), \underline{U}(l_3)$). Задаётся матрицей обратной передачи \underline{B} .

Двухпроводная алгоритмическая модель предназначена для действия в режимах трёхфазного или междуфазного короткого замыкания. В соответствии с принятой концепцией действие заключается в локализации замыканий на линии за пределами зоны $x \in (l_3, l)$, где l – длина линии.

Имитационная модель содержит нормальные и аварийные параметры. Нормальные параметры задают предшествующий режим электропередачи и сохраняются в текущем режиме. Это угол передачи δ , сопротивления передающей и приёмной систем \underline{Z}_s и \underline{Z}_r . Аварийные параметры – координата места замыкания x_f и переходное сопротивление R_f ; при замыкании в зоне защиты – $x_{f\alpha}$ и $R_{f\alpha}$, вне зоны – $x_{f\beta}$ и $R_{f\beta}$.

В данном примере, относящемся к случаю неполного наблюдения, информационная база релейной защиты представлена электрическими величинами двух режимов – предшествующего $\underline{I}_{спд}, \underline{U}_{спд}$ и сменяющего его текущего $\underline{I}_{стк}, \underline{U}_{стк}$, а также априорной информацией о диапазонах изменения параметров имитационной модели. Задача объединения имеющейся информации в случае неполного наблюдения стоит острее, чем в иных случаях. Информацию о предшествующем и текущем режимах определённым образом объединяют аварийные составляющие наблюдаемых тока и напряжения, в принятом здесь комплексном базисе это $\underline{I}_{сав} = \underline{I}_{стк} - \underline{I}_{спд}$ и $\underline{U}_{сав} = \underline{U}_{стк} - \underline{U}_{спд}$. В отличие от всех иных типов наблюдения энергообъекта, при

которых локализация может быть выполнена исключительно на основе аварийных компонентов, при неполном наблюдении такое принципиально невозможно. Информация о состоянии электропередачи, представленная четырьмя комплексами тока и напряжения, не переходит полностью в два разностных комплекса аварийных составляющих. Эффективными оказываются замеры, определяемые в виде соотношений аварийных составляющих напряжения или тока с предшествующим или текущим напряжением на выходе алгоритмической модели [5]:

$$\underline{M} = \frac{\underline{U}_{ав}^*}{\underline{U}_{пд}^*}; \quad (26)$$

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}_{тк}^*}{\underline{I}_{ав}^*}. \quad (27)$$

Замеры связаны не только с параметрами алгоритмической модели, но и с двумя эквивалентными сопротивлениями имитационной модели относительно места замыкания x_f : это $\underline{Z}_{вн}(x_f)$ – внутреннее сопротивление модели как эквивалентного генератора относительно места короткого замыкания x_f (рис. 5,а), и $\underline{Z}_{ав}(x_f)$ – коэффициент пропорциональности между аварийной составляющей тока от места наблюдения к x_f и аварийной составляющей напряжения в этом месте. Аварийные составляющие создают источник напряжения предшествующего режима в месте замыкания $\underline{U}_{пд}(x_f)$:

$$\underline{U}_{ав}(x_f) = -\frac{\underline{Z}_{вн}(x_f)}{\underline{Z}_{вн}(x_f) + R_f} \underline{U}_{пд}(x_f); \quad (28)$$

$$\underline{U}_{ав}(x_f) = -\underline{Z}_{ав}(x_f) \underline{I}_{ав}(x_f). \quad (29)$$

Напряжение текущего режима короткого замыкания

$$\underline{U}_{тк}(x_f) = \underline{U}_{ав}(x_f) + \underline{U}_{пд}(x_f) =$$

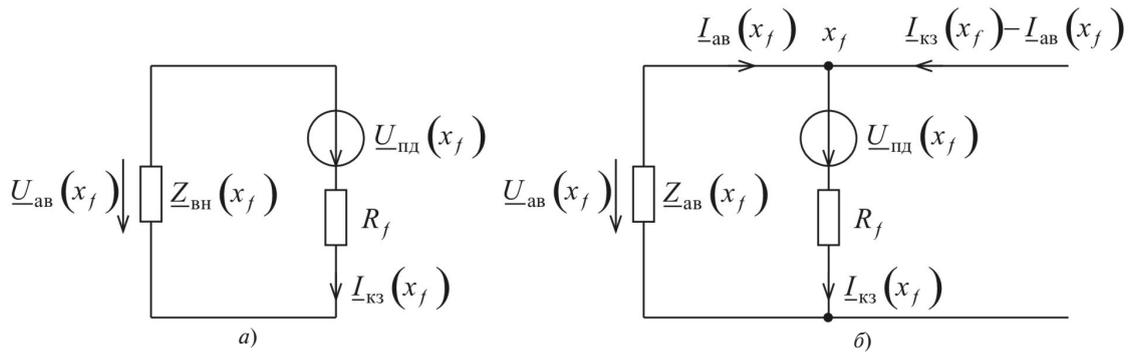


Рис. 5. Эквивалентные параметры имитационной модели: а – эквивалентный генератор аварийных составляющих; б – распределение аварийных составляющих токов

$$= \frac{R_f}{Z_{вн}(x_f) + R_f} U_{пд}(x_f). \quad (30)$$

По принципу действия алгоритмической модели её выходные величины связаны тем же соотношением (29) при $x_f = l_3$, что и соответствующие величины имитационной модели

$$U_{ав}^* = -Z_{ав}(l_3) I_{ав}^*. \quad (31)$$

Кроме того,

$$U_{тк}^* = U_{пд}^* + U_{ав}^*. \quad (32)$$

Из (31) и (32) следует взаимосвязь замеров (26), (27):

$$Z = Z_{ав}(l_3) \left(1 + \frac{1}{M} \right). \quad (33)$$

Особую роль в разграничении разнотипных режимов играет короткое замыкание на границе зоны при $x_f = l_3$, которое в равной мере можно отнести как к числу контролируемых, так и альтернативных режимов. Пусть $M_{гр}$ и $Z_{гр}$ – замеры, получаемые в данном пограничном режиме. Представив комплексные сопротивления в полярной форме $Z_{вн} = Z_{вн} \exp j\varphi_{вн}$, $Z_{ав} = Z_{ав} \exp j\varphi_{ав}$, получим на основании (26)–(30):

$$M_{гр} = \frac{-1}{1 + \frac{R_f}{Z_{вн}(l_3)} e^{-j\varphi_{вн}(l_3)}}; \quad (34)$$

$$Z_{гр} = \frac{Z_{вн}(l_3)}{Z_{ав}(l_3)} R_f e^{j(\varphi_{вн}(l_3) - \varphi_{ав}(l_3))}. \quad (35)$$

Зависимости $M_{гр}(R_f)$ и $Z_{гр}(R_f)$ при изменении R_f от нуля до бесконечности описывают годографы соответственно в форме круговой и линейной диаграмм (рис. 6). Уравнение (34) описывает дугу окружности, хордой которой является вектор $M = -1$. Заметим, что модули сопротивлений

$Z_{вн}(l_3)$ и $Z_{ав}(l_3)$ никак не влияют на форму и расположение граничных годографов, но есть влияние углов, определяемых потерями в пассивных элементах имитационной модели. В системе без потерь, где $\varphi_{вн} = 90^\circ$, центр C круговой диаграммы замера $M_{гр}$ располагается на хорде, а по мере роста потерь поднимается над нею, что приводит к увеличению радиуса и стягиванию дуги. Линейная диаграмма замера $Z_{гр}$ повёрнута относительно оси вещественных на угол $\varphi_{вн}(l_3) - \varphi_{ав}(l_3)$ и является лучом, уходящим в бесконечность при $R_f \rightarrow \infty$.

Замеры M , Z являются функциями координаты места замыкания x_f . Если пренебречь распределённой ёмкостью линии, то в имитационной модели будет выполняться равенство

$$I_{ав}(x_f) = I_{сав}, \quad (36)$$

а в алгоритмической модели

$$I_{ав}^* = I_{сав}^*. \quad (37)$$

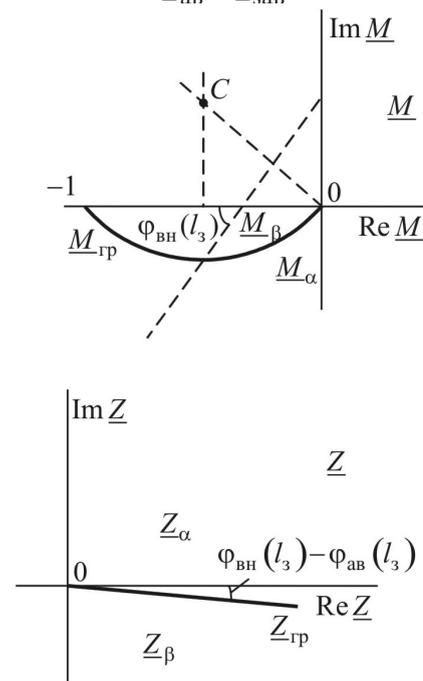


Рис. 6. Годографы замеров при замыкании в конце зоны

Из равенств (36) и (37) с учётом (31) можно получить выражение замера аварийной составляющей напряжения:

$$\underline{U}_{ав}^* = \frac{\underline{Z}_{ав}(l_3)}{\underline{Z}_{ав}(x_f)} \underline{U}_{ав}^*(x_f). \quad (38)$$

Подставляя (28) в (38), получим функцию замера (26):

$$\underline{M}(x_f) = -\frac{\underline{Z}_{ав}(l_3)}{\underline{Z}_{ав}(x_f)} \frac{H(x_f)}{1 + \frac{R_f}{\underline{Z}_{вн}(x_f)} e^{-j\varphi_H(x_f)}}; \quad (39)$$

$$\underline{H}(x_f) = \frac{\underline{U}_{пд}(x_f)}{\underline{U}_{пд}(l_3)}. \quad (40)$$

Функция замера (27) определяется с привлечением равенств (31), (32):

$$\underline{Z}(x_f) = \underline{Z}_{ав}(l_3) + \underline{Z}_{ав}(x_f) \left(1 + \frac{R_f}{\underline{Z}_{вн}(x_f)} \right) \frac{1}{\underline{H}(x_f)}. \quad (41)$$

Зависимости (39), (41) замеров \underline{M} и \underline{Z} от сопротивления имеют тот же характер, что и (34), (35), но есть отличие: годографы приобретают зависимость от напряжения предшествующего режима, точнее от его распределения вдоль линии. Зависимость проявляется тем сильнее, чем больше абсолютное значение угла передачи δ . Она влияет на положение хорды годографа $\underline{M}(R_f)$, описанием которой служит числитель дроби (39), а также и на расположение прямой $\underline{Z}(R_f)$, смещающейся при $x_f \neq l_3$ относительно начала координат и поворачивающейся относительно горизонтали.

Из анализа зависимостей (39) и (41) следует, что распознающие свойства замеров \underline{M} и \underline{Z} дополняют друг друга. В конкретном примере, приведённом в [4], замер \underline{M} обеспечил несколько более высокую распознающую способность. Результат нуждается в объяснении. Рассматривалась имитационная модель с таким соотношением параметров, что комплексная функция $\underline{H}(x_f)$ изменялась в ограниченном диапазоне. На рис. 7 приведены результаты, полученные для имитационной модели линии длиной $l=100$ км с защищаемой зоной $l_3=20$ км, удельным сопротивлением $\underline{Z}^0=0,1+j0,4$ Ом/км и варьируемыми параметрами:

Параметр	Значение параметра min/max
$R_{f\alpha}$, Ом	0/100
$R_{f\beta}$, Ом	0/ ∞
$x_{f\alpha}$, км	0/20
$x_{f\beta}$, км	20/100
δ , град.	-60/60
X_s , Ом	0/16
X_r , Ом	80/160

Распознающую способность замера можно оценить объектной характеристикой (рис. 8):

$$R_f \min \max(x_f) = \min_{x_{\text{norm}}} \max_{R_f} \arg(x \in G_\alpha; F(x) \notin S_\beta), \quad (42)$$

где

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}_{\text{norm}}^T, x_f, R_f]^T; \quad \mathbf{x}_{\text{norm}}^T = [\delta, X_s, X_r];$$

F – функционал преобразования режимов имитационной модели, задаваемых её параметрами, в замеры \underline{M} и \underline{Z} .

На первый взгляд замер \underline{M} локализует альтернативные режимы эффективнее, чем \underline{Z} . Область S_β на рис. 7,а ограничена в размерах, а на рис. 7,б простирается до бесконечности. Но такое суждение было бы поверхностным. Существенное особенности областей $S_{\alpha\beta}$. На рис. 7,а граница области $S_{\alpha\beta}$ затрагивает короткие замыкания вблизи шин передающей системы, этого нет на рис. 7,б. Как следует из рис. 8, в данном примере замер \underline{Z} явно превосходит замер \underline{M} . Однако преимущество одного замера перед другим не имеет абсолютного характера.

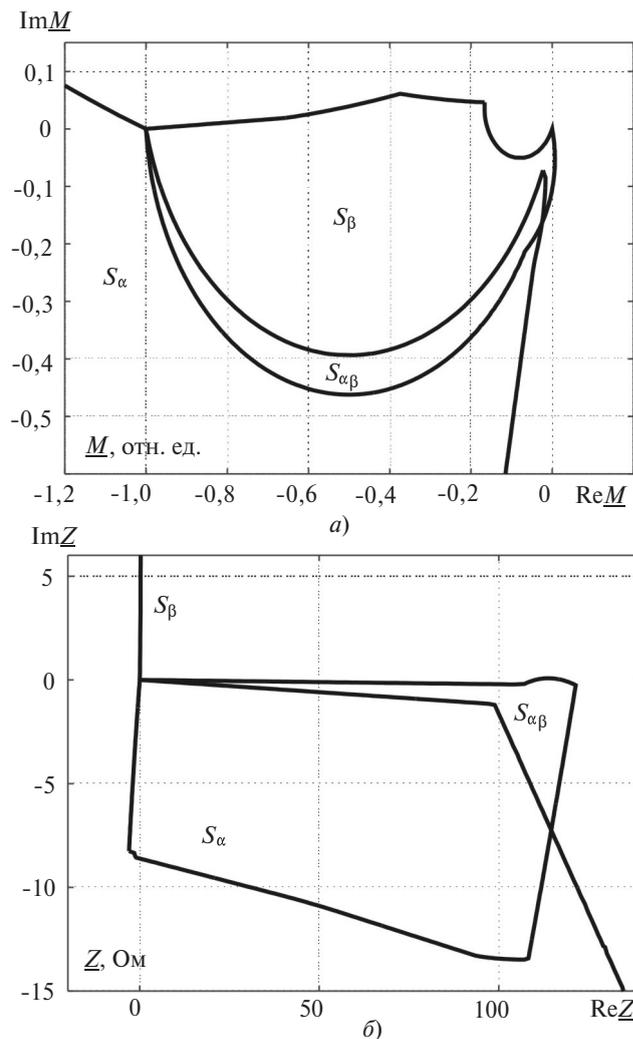


Рис. 7. Области отображения замера \underline{M} (а) и замера \underline{Z} (б) в контролируемых и альтернативных режимах

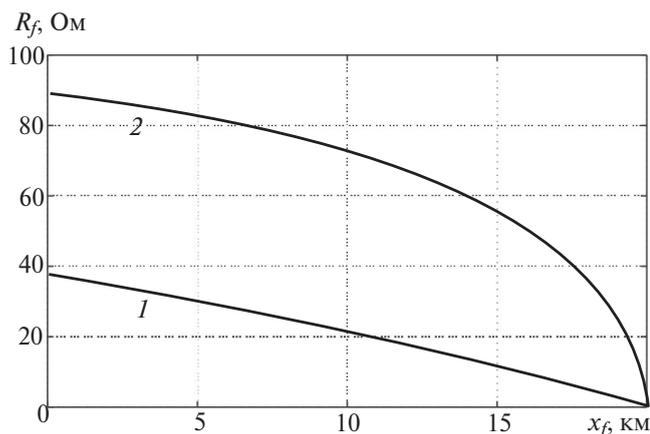


Рис. 8. Объектные характеристики замеров: 1 – замер \underline{M} ; 2 – замер \underline{Z}

Оно зависит от соотношения длины линии и защищаемой зоны, а также от диапазона изменения угла передачи и пассивных параметров наблюдаемого объекта.

Выводы. 1. Задача распознавания коротких замыканий на защищаемом энергообъекте решается при локализации всех прочих режимов, составляющих альтернативу этим коротким замыканиям.

2. Алгоритмическая модель неповреждённого энергообъекта служит инструментом локализации и становится вследствие этого индикатором повреждений.

3. Процедура локализации заключается в преобразовании наблюдаемых величин в отображаемые на соответствующих плоскостях двухкоординатные замеры. В переходных режимах, когда замеры изменяются непериодически, наглядное представление о характере наблюдаемого режима дают годографы в пространстве плоскости замера с осью времени.

4. В случае одностороннего наблюдения линии электропередачи для локализации альтернативных режимов востребованы комплексные замеры в виде отношения выходных величин алгоритмической модели в двух сменяющих друг друга режимах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sungyun C., Meliopoulos A.P. Setting-less transformer protection for ensuring security and dependability. – Elec. Eng., 2016, 98, No. 3, pp. 283–297.

2. Kezunovic M., Chen P.-C., Esmacilian A., Tasdighi M. Hierarchically coordinated protection: an integrated concept of corrective, predictive, and inherently adaptive protection. – Proc. of 5th Int. Conf. «Actual trends in development of Power System Protection and Automation», 2015, Russia, Sochi, pp. 1–9.

3. А.С. № 66343 (СССР). Устройство для защиты высоковольтных линий передачи от замыканий между фазами/А.М. Бреслер, 1944.

4. Лямец Ю.Я., Воронов П.И., Мартынов М.В., Атнишкин А.Б., Широкин М.Ю. Модель неповрежденного энергообъекта как индикатор повреждения. – Электротехника, 2017, №7, с. 60–65.

5. Лямец Ю.Я., Мартынов М.В., Маслов А.Н. Метод алгоритмических моделей. – Релейщик, 2017, № 3, с. 16–19.

6. Пат. РФ № 2612325. Способ релейной защиты энергообъекта/ Ю.Я. Лямец, А.А. Белянин, П.И. Воронов и др. – БИ, 2017, № 7.

7. Пат. РФ № 2613158. Способ определения места замыкания в электрической системе/Ю.Я. Лямец, А.А. Белянин, П.И. Воронов и др. – БИ, 2017, № 8.

8. Пат. РФ № 2617714. Способ релейной защиты трансформатора/ Ю.Я. Лямец, А.А. Белянин, П.И. Воронов и др. – БИ, 2017, № 12.

9. Ефремов В.А., Мартынов М.В., Буров А.В., Гайдаш А.А. Адаптивная дистанционная защита линии электропередачи. – Релейная защита и автоматизация, 2015, № 4, с. 26–30.

10. Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Зиновьев Д.В. и др. Многомерная релейная защита. Ч. 1. – Электричество, 2009, № 10, с. 17–25.

[21.05.2018]

Авторы: Лямец Юрий Яковлевич окончил в 1962 г. энергетический факультет Новочеркасского политехнического университета. В 1994 г. защитил во ВНИИЭ докторскую диссертацию «Адаптивные реле: теория и приложение к задачам релейной защиты и автоматики электрических систем». Председатель НТС ООО «Релематика». Профессор кафедры ТОЭ и РЗА Чувашского госуниверситета (ЧГУ).

Воронов Павел Ильич окончил в 2014 г. факультет энергетике и электротехники ЧГУ. В 2015 г. в ЧГУ защитил кандидатскую диссертацию «Информационные аспекты защиты и локализации поврежденных электрической сети». Заведующий сектором ООО «Релематика».

Атнишкин Александр Борисович окончил в 2016 г. факультет энергетике и электротехники ЧГУ. Аспирант ЧГУ, инженер-исследователь ООО «Релематика».

Recognition of Emergency Conditions by the Localization of Alternative States

LIAMETS Yuriyi Ya. (Chuvash State University (ChSU), Cheboksary, Russia) – Professor, Dr. Sci (Eng.) Chairman of the Scientific and Technical Council LLC «Relematika».

VORONOV Pavel I. (LLC «Relematika», Cheboksary, Russia) – Head of Sector, Cand. Sci. (Eng.)

ATNISHKIN Alexander B. (LLC «Relematika», Cheboksary, Russia) – Research Engineer, Postgraduate Student of ChSU

A variety of conditions of the electrical system, which includes the protected power object, is divided into a subset of states of damaged object and the remaining subset of alternative states. The recognition task of the states of the first subset is solved by the procedure of localization of the second subset opposing it. The localization tool is an algorithmic model of an undamaged power object that is adequate to it in alternative states and is inadequate in case of its damage. This model transforms the current and a priori information about the power object into two-coordinate measurements in the forms of the functions of time or complexes which displayed on their planes, possibly with the addition of a time axis. States of different subsets are displayed in different ways which creates favorable opportunities for detecting damage to the power object. As an example are considered a transformer and a transmission line. To protect the transformer it is important to distinguish the turn-to-turn short circuits in the winding and external short circuits. For a one-ended observed transmission line it is important to providing high sensitivity to faults in the protected area with guaranteed blocking in case of external faults.

Key words: power object, recognition, state, short circuit, relay protection, localization

REFERENCES

1. Sungyun C., Meliopoulos A.P. Setting-less transformer protection for ensuring security and dependability. – Elec. Eng., 2016, 98, No. 3, pp. 283–297.
2. Kezunovic M., Chen P.-C., Esmailian A., Tasdighi M. Hierarchically coordinated protection: an integrated concept of corrective, predictive, and inherently adaptive protection. – Proc. of 5th Int. Conf. «Actual trends in development of Power System Protection and Automation», 2015, Russia, Sochi, pp. 1–9.
3. A.S. № 66343 (USSR). *Ustrojstvo dlya zashchity vysokovol'tnykh linii peredachi ot zamykaniy mezhdu fazami* (C.A. No. 66343(USSR). Device for protecting high-voltage transmission lines from phase-to-phase closures)/A.M. Bresler, 1944.
4. Lyamets Yu.Ya., Voronov P.I., Martynov M.V., Atnishkin A.B., Shirokin M.Yu. *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2017, No.7, pp. 60–65.
5. Lyamets Yu.Ya., Martynov M.V., Maslov A.N. *Releishchik – in Russ. (Relay Protection Specialist)*, 2017, No.3, pp. 16–19.
6. Pat. RF № 2612325. *Sposob releynoi zashchity energoob'ekta* (Pat. RF № 2612325. Method of relay protection of power facilities)/ Yu.Ya. Lyamets, A.A. Belyanin, P.I. Voronov et al. – Bulletin of inventions, 2017, № 7.
7. Pat. RF № 2613158. *Sposob opredeleniya mesta zamykaniya v elektricheskoy sisteme* (Pat. RF No. 2613158. Method for determining the location of the closure in the electrical system)/Yu.Ya. Lyamets, A.A. Belyanin, P.I. Voronov et al. – Bulletin of inventions, 2017, No.8.
8. Pat. RF № 2617714. *Sposob releynoy zashchity transformatora* (Pat. RF № 2617714. Method of relay protection of the transformer)/Yu.Ya. Lyamets, A.A. Belyanin, P.I. Voronov et al. Bulletin of inventions, 2017, No. 12.
9. YeEfremov V.A., Martynov M.V., Burov A.V., Gaydash A.A. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya – in Russ. (Relay Defense and Automation)*, 2015, No. 4, pp. 26–30.
10. Lyamets Yu.Ya., Nudel'man G.S., Zinov'ev D.V. et al. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2009, No. 10, pp. 17–25.