

Особенности расчета микропроцессорной дистанционной защиты линий электропередачи напряжением 110—220 кВ

ГАРКЕ В.Г., КОНОВА Е.А.

Проводится анализ факторов, влияющих на выбор характеристики срабатывания измерительного органа сопротивления. На основе данного анализа получены выражения для расчета параметров срабатывания микропроцессорной дистанционной защиты линий электропередачи напряжением 110—220 кВ.

Ключевые слова: линия электропередачи, дистанционная защита, характеристика срабатывания, короткое замыкание, переходное сопротивление, нагрузочный режим

Дистанционный принцип получил широкое распространение в технике релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем, прежде всего при выполнении дистанционных защит (ДЗ) линий электропередачи [1].

В период с 1960 по 1985 гг. ведущими организациями СССР в области энергетики под руководством А.М. Федосеева были разработаны Руководящие указания по релейной защите, в том числе и для дистанционной защиты линий электропередачи напряжением 110—220 кВ, выполненной на электромеханической элементной базе [2, 3].

Дистанционная защита в составе панели ЭПЗ-1636 [4] используется для защиты от междуфазных коротких замыканий (КЗ), а характеристика срабатывания реле сопротивления представляет собой окружность.

Следующим этапом развития дистанционной защиты явилось появление устройств на микроэлектронной базе. Характеристики срабатывания реле сопротивления ДЗ в составе шкафов типов ШДЭ 2801 и ШДЭ 2802 [5] имеют более сложные формы, однако регулировка обеспечивается только для уставки по сопротивлению срабатывания.

Переход техники релейной защиты на микропроцессорную элементную базу позволяет расширить возможности повышения показателей ДЗ: новые виды характеристик срабатывания измерительного органа (ИО) сопротивления, высокая селективность, чувствительность и быстродействие.

Рассмотрим характеристики срабатывания ДЗ подробнее на примере шкафа защиты линии и автоматики управления выключателем ШЭ2607 016 производства ООО НПП «ЭКРА» [6].

Характеристика срабатывания каждого из ИО сопротивления (рис. 1) представляет собой парал-

Factors influencing selection of the actuation characteristic of an impedance measurement unit are analyzed. Expressions for calculating the actuation parameters of microprocessor distance protection for 110—220 kV power lines are obtained on the basis of this analysis.

Key words: power line, short-circuit fault, distance protection, actuation characteristic, transition resistance, load mode

лелограмм, верхняя сторона которого параллельна оси R и пересекает ось X в точке с координатой $X_{уст}$, а правая сторона имеет угол наклона j_1 относительно оси R и пересекает ее в точке с координатой $R_{уст}$. Характеристики ИО сопротивления направленных ступеней ограничены двумя отрезками, исходящими из начала координат и расположенными во втором и четвертом квадрантах, причем направленность определяется углами наклона j_3 и j_2 этих отрезков относительно оси R соответ-

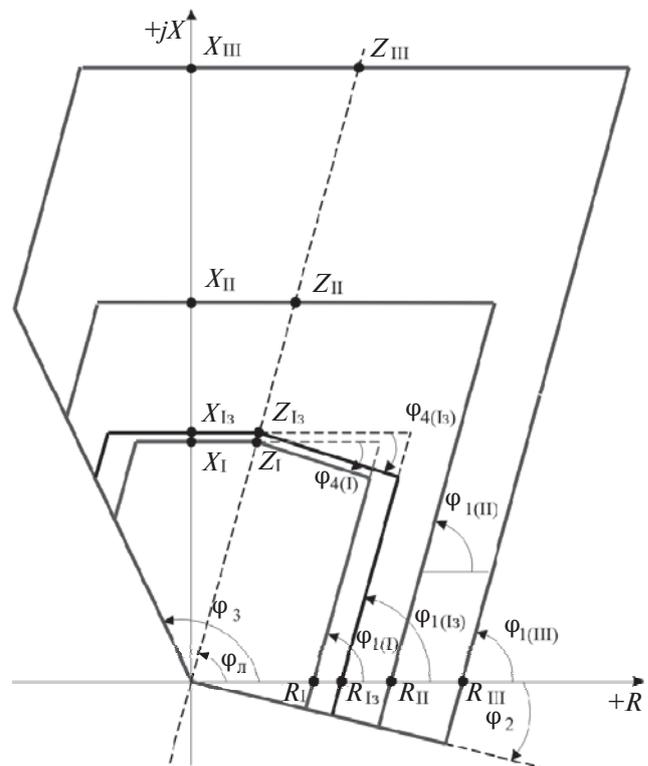


Рис. 1. Характеристики срабатывания ИО сопротивления ступеней ДЗ

ственно. Для характеристик ИО защиты I ступени от междуфазных КЗ и I ступени от однофазных КЗ дополнительно существует область, вырезаемая углом j_4 [2].

Измерительный орган сопротивления защиты от междуфазных КЗ (I – III ступени ДЗ) использует в качестве входных значений разности фазных токов ($I_A - I_B, I_B - I_C, I_C - I_A$) и соответствующие междуфазные напряжения (U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}) аналогично тому, как это принято для электромеханических защит [2, 3].

Первая ступень ДЗ от КЗ на землю содержит также три ИО сопротивления, включенные на фазные напряжения (U_{A0}, U_{B0}, U_{C0}) и соответствующие фазные токи (I_A, I_B, I_C) с учетом компенсации тока нулевой последовательности защищаемой линии ($3I_0$) и параллельной линии ($3I_{0II}$).

Для обеспечения направленности защиты и срабатывания ее при металлических КЗ в пределах заданной зоны характеристика защиты в комплексной плоскости должна проходить через начало координат и точку, соответствующую концу защищаемой зоны. В остальном форма характеристики должны быть подчинена условиям, обеспечивающим требования срабатывания в защищаемой зоне и несрабатывания вне ее при наличии различных факторов, искажающих работу защиты [7].

Влияние подпитки места КЗ. Значение уставки срабатывания ИО сопротивления при угле защищаемой линии или защищаемого объекта $Z_{устN}$ определяется по известным выражениям для расчета уставок электромеханических защит, которые приведены в [2, 3].

Основной особенностью измерения входного сопротивления II и III ступенями ДЗ является различие токов, протекающих в месте установки защиты и в месте повреждения [8] (рис. 2). При КЗ в точке K ток I_{K31} на входе ДЗ, установленной в точке I , не равен току $I_{K31} + I_{K33}$, протекающему по поврежденному участку линии в зоне резервирования, вследствие подпитки места повреждения током I_{K33} от системы $C3$.

Для нахождения области сопротивления на входе ДЗ рассмотрим схему электрической системы (рис. 2), а также эквивалентную схему замещения при КЗ на линии L_2 (рис. 3).

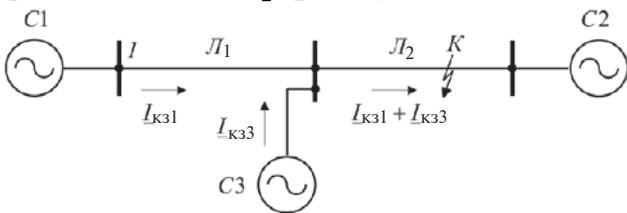


Рис. 2. Электрическая схема при КЗ на линии L_2 в зоне II и III ступеней ДЗ

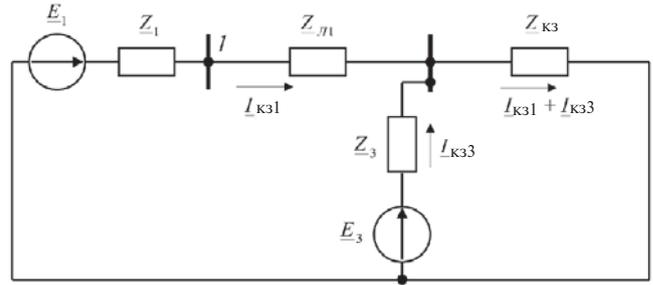


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения электрической системы при КЗ на линии L_2 в зоне II и III ступеней ДЗ: E_1, E_3 (подпитка), Z_1, Z_3 – эквивалентные ЭДС и сопротивления систем $C1$ и $C3$ соответственно; $Z_{Л1}$ – сопротивление защищаемой линии; Z_{K3} – сопротивление участка между концом защищаемой линии и местом повреждения

Сопротивление в месте установки ДЗ (точка I на рис. 2 и 3):

$$Z_{ДЗ} = Z_{Л1} + Z_{K3} \frac{q(Z_1 + Z_{Л1}) + Z_3}{Z_3 + Z_{K3} - qZ_{K3}}, \quad (1)$$

где $q = E_3 / E_1$

Найдем области, в которых располагается сопротивление $Z_{ДЗ}$ на входе ДЗ при КЗ в зоне резервирования с учетом ограничений:

- 1) соотношение ЭДС E_1 и E_3 по модулю находится в пределах $q_1 \leq |q| \leq q_2$, где $q_1 < 1, q_2 > 1$;
- 2) из условия устойчивости электрической системы угол $d = \arg q$ находится в пределах $d_1 \leq \arg q \leq d_2$, где $d_1 = -90^\circ; d_2 < 90^\circ$, что соответствует пределу устойчивости.

Преобразуем (1) к виду

$$q = \frac{Z_{ДЗ}(Z_3 + Z_{K3}) - (Z_{Л1}Z_3 + Z_{Л1}Z_{K3} + Z_3Z_{K3})}{Z_{ДЗ}Z_{K3} + Z_1Z_{K3}}. \quad (2)$$

Условие $q_1 \leq |q| \leq q_2$ примет вид:

$$\left| \frac{Z_{ДЗ}(Z_3 + Z_{K3}) - (Z_{Л1}Z_3 + Z_{Л1}Z_{K3} + Z_3Z_{K3})}{Z_{ДЗ}Z_{K3} + Z_1Z_{K3}} \right| \leq q_1; \quad (3)$$

$$\left| \frac{Z_{ДЗ}(Z_3 + Z_{K3}) - (Z_{Л1}Z_3 + Z_{Л1}Z_{K3} + Z_3Z_{K3})}{Z_{ДЗ}Z_{K3} + Z_1Z_{K3}} \right| \leq q_2. \quad (3a)$$

Граничной линией области, описываемой неравенством (3), в плоскости Z является окружность. Центр Z_{ϕ_0} и радиус R_{ϕ} окружности определяются соотношениями [8, 9] (рис. 4, окружность L):

$$Z_{\phi_0} = \frac{a - (q_1 k)^2 b}{1 - (q_1 k)^2}; \quad (4)$$

$$R_{\phi} = q_1 k \left| \frac{a - b}{1 - (q_1 k)^2} \right|, \quad (5)$$

где $a = -k_4 / k_3$; $b = -k_2 / k_1$; $k = |k_1 / k_3|$;
 $k_3 = Z_3 + Z_{K3}$; $k_4 = -(Z_{Л1} Z_3 + Z_{Л1} Z_{K3} + Z_3 Z_{K3})$;
 $k_1 = Z_{K3}$; $k_2 = Z_1 Z_{K3}$.

Выражение (3а) соответствует области, границей которой является окружность с параметрами Z_0^2 , R_{ϕ} определяемыми (4) и (5) при замене q_1 на q_2 (рис. 4, окружность 2).

Найдем ограничения области расположения $Z_{ДЗ}$, определяемые условием $d_1 \leq \arg q \leq d_2$, по предельным углам расхождения ЭДС \underline{E}_1 и \underline{E}_3 . С учетом (2) получим

$$d_1 \leq \arg \frac{Z_{ДЗ} (Z_3 + Z_{K3}) - (Z_{Л1} Z_3 + Z_{Л1} Z_{K3} + Z_3 Z_{K3})}{Z_{ДЗ} Z_{K3} + Z_1 Z_{K3}} \leq d_2. \quad (6)$$

Вводя обозначение [8, 9] $\arg(k_3 / k_1) = b$ и учитывая, что аргумент произведения равен сумме аргументов множителей, преобразуем неравенство (6) к виду

$$d_1 - b \leq \arg \frac{Z_{ДЗ} - a}{Z_{ДЗ} - b} \leq d_2 - b,$$

откуда получаем:

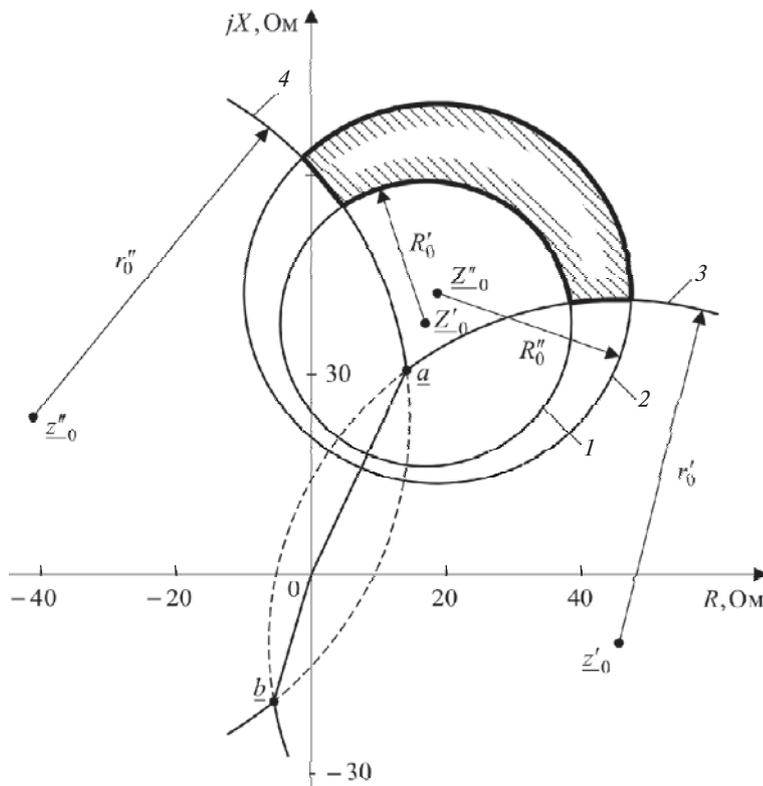


Рис. 4. Зона расположения вектора сопротивления на зажимах ИО сопротивления ДЗ при КЗ на смежной линии, которая имеет подпитку

$$\arg \frac{Z_{ДЗ} - a}{Z_{ДЗ} - b} \leq d_1 - b; \quad (7)$$

$$\arg \frac{Z_{ДЗ} - a}{Z_{ДЗ} - b} \geq d_2 - b. \quad (7a)$$

Этим уравнениям соответствуют при $d_1 \neq 0$ и $d_1 \neq \pi$, $d_2 \neq 0$ и $d_2 \neq \pi$ две дуги окружностей с вписанными углами $d_1 - b$ и $d_2 - b$, опирающиеся на точки a и b [8, 9]. Центр и радиус дуги окружности, описываемой выражением (7), равны (рис. 4, дуга окружности 3):

$$z_{\phi} = \frac{a + b}{2} + j \frac{a - b}{2 \operatorname{tg}(d_1 - b)}; \quad (8)$$

$$r_{\phi} = \left| \frac{a - b}{2 \sin(d_1 - b)} \right|. \quad (9)$$

Параметры z_{ϕ} и r_{ϕ} окружности, описываемой выражением (7а), определяются из (8) и (9) при замене d_1 на d_2 (рис. 4, дуга окружности 4).

На рис. 4 показана зона расположения конца вектора сопротивления на зажимах ИО сопротивления ДЗ при КЗ на смежной линии, которая имеет подпитку (указанная область заштрихована).

Данный анализ позволяет определить изменения зоны действия II и III ступеней ДЗ с учетом подпитки. В [2, 3] в выражениях для выбора сопротивления срабатывания II ступени ДЗ коэффициентом k_T , равным отношению первичного тока в защите к току в рассматриваемом участке, учитывается токораспределение, причем данный коэффициент считается вещественным. Как видно из проведенного анализа, в общем случае коэффициент токораспределения является комплексной величиной.

Зная уставку срабатывания ИО $Z_{устN}$, можно определить его уставку срабатывания по оси X:

$$Z_{устN} = Z_{устN} \sin j_{Л},$$

где $j_{Л}$ — угол защищаемой линии или защищаемого объекта.

Влияние переходного сопротивления в месте КЗ. Правая боковая, нижняя и верхняя правые части характеристики ИО сопротивления предназначены для обеспечения срабатывания ИО при КЗ через переходное сопротивление.

Переходные сопротивления в месте КЗ в общем случае определяются сопро-

тивлениями электрических дуг, посторонних предметов в месте повреждения, опор и их заземлений, а также сопротивлениями между проводами фаз и землей (через деревья и падение проводов на землю) и носят активный характер.

Переходное сопротивление в точке КЗ: при междуфазных КЗ

$$R_{\text{пер}} = R_{\text{д}} / 2;$$

при однофазных

$$R_{\text{пер}} = R_{\text{д}} + R_{\text{оп}}$$

где $R_{\text{д}}$ — сопротивление электрической дуги; $R_{\text{оп}}$ — эквивалентное сопротивление опоры относительно земли.

При двухфазном КЗ сопротивление замера ИО равно [10]:

$$\underline{Z}_{\text{зм}} = \underline{Z}_{1\text{к}} + 0,5\underline{U}_{\text{д}} / \underline{I}_{\text{I}}, \quad (10)$$

где $\underline{Z}_{1\text{к}}$ — сопротивление прямой последовательности от места уставки ДЗ до места КЗ; $\underline{U}_{\text{д}}$ — вектор напряжения на дуге, совпадает по направлению с вектором тока через дугу; \underline{I}_{I} — вектор тока, который подается на ИО сопротивления.

При одностороннем питании ток, который подается на ИО, равен току дуги и вектор напряжения на дуге совпадает по направлению с вектором этого тока, т.е. сопротивление на входе ИО является активным и равно из (10):

$$R_{\text{пер.зм}} = 0,5\underline{U}_{\text{д}} / \underline{I}_{\text{I}}.$$

При двухстороннем питании ток, который подается на ИО сопротивления, не равен току дуги, который равен сумме токов с двух сторон питания, и направление вектора напряжения на дуге совпадает с вектором суммы токов, т.е. сопротивление на входе ИО сопротивления является комплексным и равно из (10):

$$\underline{Z}_{\text{пер.зм}} = \frac{0,5\underline{U}_{\text{д}}}{\underline{I}_{\text{I}}} (\cos d_1 + i \sin d_1), \quad (11)$$

где d_1 — угол между вектором тока, который подается на ИО сопротивления, \underline{I}_{I} и вектором суммы токов через дугу $\underline{I}_{\text{I}} + \underline{I}_{\text{II}}$.

При однофазном КЗ через переходное сопротивление на линии с односторонним питанием, на приемном конце которой отсутствуют трансформаторы с заземленной нейтралью, и при отдельном задании коэффициентов компенсации тока нулевой последовательности линии по осям R и X справедливы соотношения [10]:

$$X_{\text{зм.ф}} = \frac{\operatorname{Im} \frac{\underline{U}_{\text{д}}}{\underline{I}_{\text{I}}}}{\frac{\underline{U}_{\text{д}}}{\underline{I}_{\text{I}}}} = X_{\text{д}}; \quad (12)$$

$$R_{\text{зм.ф}} = \frac{\operatorname{Re} \frac{\underline{U}_{\text{д}}}{\underline{I}_{\text{I}}}}{\frac{\underline{U}_{\text{д}}}{\underline{I}_{\text{I}}}} = R_{1\text{к}} + \frac{R_{\text{д}} + R_{\text{оп}}}{1 + K_R}, \quad (13)$$

где $X_{\text{зм.ф}}$, $R_{\text{зм.ф}}$ — индуктивное и активное сопротивления прямой последовательности, измеряемые ИО сопротивления ДЗ от КЗ на землю; $\underline{U}_{\text{д}}$, \underline{I}_{I} — напряжение и ток, которые подаются на ИО сопротивления при однофазных КЗ; $X_{1\text{к}}$, $R_{1\text{к}}$ — индуктивное и активное сопротивления прямой последовательности до места КЗ.

Следовательно, переходное сопротивление в месте КЗ, измеряемое ИО, является активным и равно из (13):

$$R_{\text{пер.зм}} = \frac{R_{\text{д}} + R_{\text{оп}}}{1 + K_R}. \quad (14)$$

При однофазном КЗ через переходное сопротивление на линии с двухсторонним питанием справедливы соотношения [10]:

$$X_{\text{зм.ф}} = \frac{\operatorname{Im} \frac{\underline{U}_{\text{д}}}{\underline{I}_{\text{I}}}}{\frac{\underline{U}_{\text{д}}}{\underline{I}_{\text{I}}}} = X_{1\text{к}} + \frac{\frac{\underline{U}_{\text{д}}}{\underline{I}_{\text{I}}} + R_{\text{оп}} \frac{|\underline{I}_{\text{I}} + \underline{I}_{\text{II}}|}{\underline{I}_{\text{I}}}}{1 + K_X} \frac{\sin d_1}{\frac{\underline{U}_{\text{д}}}{\underline{I}_{\text{I}}}};$$

$$R_{\text{зм.ф}} = \frac{\operatorname{Re} \frac{\underline{U}_{\text{д}}}{\underline{I}_{\text{I}}}}{\frac{\underline{U}_{\text{д}}}{\underline{I}_{\text{I}}}} = R_{1\text{к}} + \frac{\frac{\underline{U}_{\text{д}}}{\underline{I}_{\text{I}}} + R_{\text{оп}} \frac{|\underline{I}_{\text{I}} + \underline{I}_{\text{II}}|}{\underline{I}_{\text{I}}}}{1 + K_R} \frac{\cos d_1}{\frac{\underline{U}_{\text{д}}}{\underline{I}_{\text{I}}}},$$

т.е. переходное сопротивление на входе ИО сопротивления является комплексным и равно:

$$\underline{Z}_{\text{пер.зм}} = \frac{\frac{\underline{U}_{\text{д}}}{\underline{I}_{\text{I}}} + R_{\text{оп}} \frac{|\underline{I}_{\text{I}} + \underline{I}_{\text{II}}|}{\underline{I}_{\text{I}}}}{1 + K_R} \frac{\cos d_1}{\frac{\underline{U}_{\text{д}}}{\underline{I}_{\text{I}}}} +$$

$$+ j \frac{\frac{\underline{U}_{\text{д}}}{\underline{I}_{\text{I}}} + R_{\text{оп}} \frac{|\underline{I}_{\text{I}} + \underline{I}_{\text{II}}|}{\underline{I}_{\text{I}}}}{1 + K_X} \frac{\sin d_1}{\frac{\underline{U}_{\text{д}}}{\underline{I}_{\text{I}}}}. \quad (15)$$

Уставка срабатывания по оси R определяется переходным сопротивлением, которое замеряется ИО сопротивления, и равна:

при междуфазных КЗ из условия $q_1 \leq |q| \leq q_2$ и (11)

$$R_{\text{уст}N} = 0,5 \frac{U_{\text{д}}^* 1,5I_{\text{д}}}{k_{\text{зап}} I_{\text{I}}}$$

или $R_{\text{уст}N} = 0,5 \frac{U_{\text{д}}^* 1,5I_{\text{д}}}{k_{\text{зап}} I_{\text{I}}} \cos d_1 \quad (16)$

при однофазных КЗ из (14) и (15)

$$R_{устV} = \frac{U_d^* 1,5l_d / I_I + R_{оп}}{k_{зап} (1 + K_R)} \text{ или}$$

$$R_{устV} = \frac{U_d^* 1,5l_d + R_{оп} |\bar{I}_I + \bar{I}_{II}|}{k_{зап} I_I (1 + K_R)} \cos \alpha_1, \quad (17)$$

где $1,5l_d$ — удлинение дуги относительно расстояния провод — провод или провод — опора из-за ее формы; $k_{зап}$ — коэффициент запаса, равный 0,8, 0,9 для надежного срабатывания при КЗ через переходное сопротивление.

Угол наклона правой боковой части характеристики ИО сопротивления $j_{1(N)}$ определяется из найденных ранее величин:

$$j_{1(N)} = \arctg \frac{X_{устN}}{Z_{устN} \cos j_{л} + R_{устNкон} - R_{устN}} \frac{\ddot{\varphi}}{\ddot{\varphi}}$$

где $R_{устNкон}$ — уставка по переходному сопротивлению ИО в конце зоны действия N ступени ДЗ, которая определяется по выражениям (16) или (17), но для точки КЗ не в начале линии, а в конце зоны действия соответствующей ступени ДЗ.

Угол наклона нижней правой части характеристики ИО сопротивления всех ступеней j_2 и угол наклона верхней правой части характеристики ИО сопротивления I ступени от междуфазных КЗ и I ступени от однофазных КЗ $j_{4(I)}$, $j_{4(I3)}$, соответственно, определяются по одним и тем же условиям.

Для передачи мощности по линиям электропередачи необходим сдвиг фаз системных напряжений. Поэтому при КЗ питающие ЭДС имеют различные углы; ЭДС на передающем конце опережает ЭДС на принимающем конце на угол α . Поэтому в первом приближении токи КЗ на обоих концах линии имеют такой же сдвиг по фазе [11]. Соответственно, и нижняя правая часть характеристики ИО сопротивления должна быть повернута для охвата всех возможных сопротивлений в месте КЗ в начале линии электропередачи. Данный угол определяется из выражений (11) и (15):

при междуфазных КЗ

$$j_{2(N)} \approx \alpha_1;$$

при однофазных КЗ

$$j_{2(V)} \approx \arctg \frac{\alpha + K_R}{\alpha + K_X} \operatorname{tg} \alpha_1 \frac{\ddot{\varphi}}{\ddot{\varphi}}$$

Угол наклона верхней правой части характеристики ИО сопротивления используется только для I ступени от междуфазных КЗ и I ступени от однофазных КЗ. Он необходим для отстройки от КЗ через переходное сопротивление в начале последующей линии электропередачи.

С этой целью верхнюю правую часть характеристики (рис. 1) поворачивают на угол поворота вектора сопротивления, который определяется точно так же, как угол j_2 из выражений (11) и (15).

Таким образом, наличие данного фактора обуславливает необходимость расширения характеристики срабатывания ИО для охвата области входных сопротивлений при данном виде повреждения.

Влияние нагрузочных режимов. Эквивалентная схема электрической сети в общем случае в симметричном нагрузочном режиме, не сопровождающемся КЗ, представлена на рис. 5.

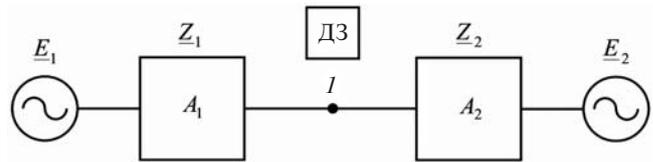


Рис. 5. К анализу действия ДЗ в нагрузочных режимах электрической сети: E_1, E_2 и Z_1, Z_2 — эквивалентные ЭДС и сопротивления системы с двусторонним питанием, приведенные к точке I (место установки ДЗ) [8, 10]

В симметричном нагрузочном режиме ток, напряжение и сопротивление на входе ДЗ определяются соотношениями [8, 10]:

$$I_H = \frac{E_1 - E_2}{Z_1 + Z_2}; \quad (18)$$

$$U_H = \frac{E_1 Z_2 - E_2 Z_1}{Z_1 + Z_2}; \quad (19)$$

$$Z_H = \frac{U_H}{I_H} = \frac{E_1 Z_2 + E_2 Z_1}{E_1 - E_2} = \frac{Z_2 + q Z_1}{1 - q}, \quad (20)$$

где $q = E_1 / E_2$

Найдем области, в которых располагается сопротивление Z_H на входе ДЗ в нагрузочном режиме, с учетом ограничений $q_1 \leq |q| \leq q_2$ и $\alpha_1 \leq \arg q \leq \alpha_2$.

Преобразуем (20) к виду [8, 10]:

$$q = \frac{Z_H - Z_2}{Z_H + Z_1}. \quad (21)$$

Условие $q_1 \leq |q| \leq q_2$ примет вид:

$$\left| \frac{Z_H - Z_2}{Z_H + Z_1} \right| \leq q_1; \quad (22)$$

$$\left| \frac{Z_H - Z_2}{Z_H + Z_1} \right| \leq q_2. \quad (22a)$$

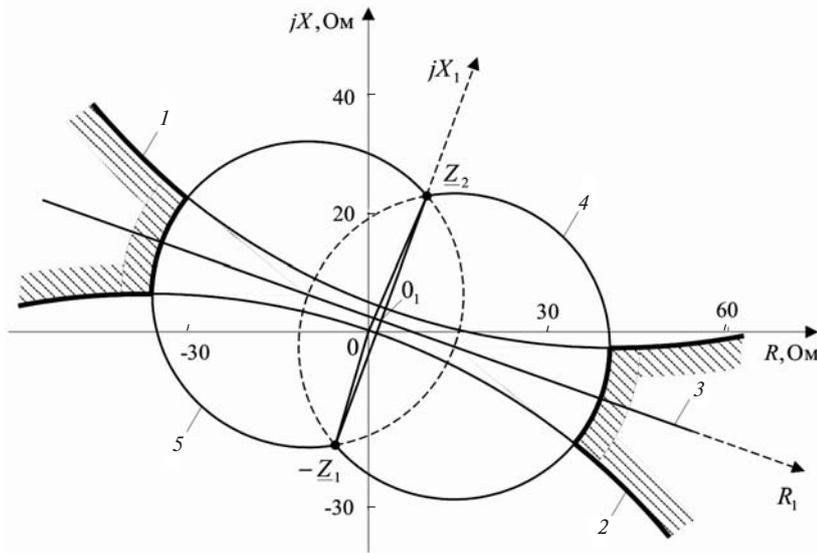


Рис. 6. Зоны расположения вектора сопротивления на зажимах ИО сопротивления ДЗ в нагруженном режиме

Граничной линией области, описываемой неравенством (22), в плоскости Z является окружность. Центр $\underline{Z}_{\phi 0}$ и радиус R_{ϕ} окружности определяются соотношениями [8–10, 12] (рис. 6, дуга окружности 1):

$$\underline{Z}_{\phi 0} = \frac{\underline{Z}_2 + q_1^2 \underline{Z}_1}{1 - q_1^2}; \tag{23}$$

$$R_{\phi} = q_1 \left| \frac{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1}{1 - q_1^2} \right|. \tag{24}$$

Выражение (22a) соответствует области, границей которой является окружность с параметрами $\underline{Z}_{\phi 0}$, R_{ϕ} определяемыми по (23) и (24) при замене q_1 на q_2 (рис. 6, дуга окружности 2).

При $|q|=1$, т.е. $|\underline{E}_2|=|\underline{E}_1|$, уравнение (21) приобретает вид:

$$|\underline{Z}_H - \underline{Z}_2| = |\underline{Z}_H + \underline{Z}_1|.$$

В этом случае граничная линия – это геометрическое место точек, равноотстоящих от заданных точек \underline{Z}_2 и $-\underline{Z}_1$. Таким геометрическим местом является перпендикуляр к вектору $\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1$, восстановленный в его середине (рис. 6, прямая 3) [9].

Найдем ограничения области расположения $\underline{Z}_{ДЗ}$, определяемые условием $d_1 \leq \arg q \leq d_2$, по предельным углам расхождения ЭДС \underline{E}_1 и \underline{E}_2 . С учетом (21) это условие примет вид

$$d_1 \leq \arg \frac{\underline{Z}_H - \underline{Z}_2}{\underline{Z}_H + \underline{Z}_1} \leq d_2.$$

Граничные условия (уравнения граничной линии):

$$\arg \arg \frac{\underline{Z}_H - \underline{Z}_2}{\underline{Z}_H + \underline{Z}_1} \leq d_1; \tag{25}$$

$$\arg \arg \frac{\underline{Z}_H - \underline{Z}_2}{\underline{Z}_H + \underline{Z}_1} \leq d_2, \tag{26}$$

где $\arg \frac{\underline{Z}_H - \underline{Z}_2}{\underline{Z}_H + \underline{Z}_1}$ – угол, на который вектор $\underline{Z}_H + \underline{Z}_1$

отстаёт от вектора $\underline{Z}_H - \underline{Z}_2$. Уравнение (25) при $d_1 \neq 0$ и $d_1 \neq \pi$ представляет собой дугу окружности, по которой от точки \underline{Z}_2 к точке $-\underline{Z}_1$ движение происходит по часовой стрелке при отрицательном значении d_1 (рис. 6, дуга окружности 4) [9].

Центр \underline{z}_{ϕ} и радиус r_{ϕ} окружности могут быть определены по формулам:

$$\underline{z}_{\phi} = \frac{\underline{Z}_2 - \underline{Z}_1}{2} + j \frac{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1}{2 \operatorname{tg} d_1}; \tag{27}$$

$$r_{\phi} = \left| \frac{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1}{2 \sin d_1} \right|. \tag{28}$$

Аналогично получим часть граничной линии в плоскости Z , соответствующую уравнению (26). Она представляет собой дугу окружности, опирающуюся на точки \underline{Z}_2 и $-\underline{Z}_1$ и имеющую вписанный угол d_2 . Следует отметить, что уравнению (26) соответствует лишь та часть окружности, по которой от точки \underline{Z}_2 , к точке $-\underline{Z}_1$ движение происходит против часовой стрелки при положительном значении d_2 [9].

Центр \underline{z}_{ϕ} и радиус r_{ϕ} окружности, описываемой выражением (26), определяются по (27) и (28) при замене d_1 на d_2 (рис. 6, дуга окружности 5).

Результирующие области нагруженных режимов определяются как общие для условий $q_1 \leq |q| \leq q_2$ и $d_1 \leq \arg q \leq d_2$.

На рис. 6 построены области нагруженных режимов – заштрихованные области вне дуг окружностей 1, 2, 4 в I и IV квадрантах и 1, 2 и 5 во II и III квадрантах плоскости Z .

Зная области расположения входных сопротивлений ДЗ в нагруженных режимах, можно определить оптимальные параметры так называемого «выреза нагрузки». Введем новые оси координат R_1 и jX_1 (рис. 6) для наглядного и простого выражения параметров нагрузки и ИО сопротивления. Следует отметить, что в общем случае вырез на-

грузки должен быть симметричным относительно оси $O_1 R_1$, перпендикулярной к вектору $\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1$ и проходящей через его середину (рис. 6). Тогда сопротивление в нагрузочном режиме в новых осях равно

$$R_n = \frac{|\bar{Z}_2 + \bar{Z}_1|}{2 \operatorname{tg}(d/2)}$$

Угол нагрузки j_n можно найти из треугольника с вершинами: O_1 , в точке пересечения окружностей 1 и 4 и в точке пересечения оси R_1 и окружности 4 (рис. 6).

Уставки ИО сопротивления определяются параметрами сопротивления нагрузки с коэффициентом запаса, характерным для ДЗ.

Угол наклона нижней левой части характеристики ИО сопротивления j_3 рассчитывается, исходя из условия отстройки от максимальной нагрузки, которая может передаваться от линии к шинам, т.е. от второго источника питания (рис. 2).

Таким образом, применение «выреза нагрузки» позволяет повысить селективность ИО сопротивления в нагрузочном режиме.

На рис. 7 показаны характеристики ИО сопротивления ДЗ с учетом влияния рассмотренных факторов.

Выводы. 1. Микропроцессорная ДЗ имеет гибкие регулируемые характеристики ИО сопротивления, которые позволяют при новом подходе расчета указанных характеристик учитывать различные режимы защищаемой электрической сети.

2. При учете подпитки КЗ от третьей системы установлено, что коэффициент тока распределения подпитки является комплексной величиной, т.е. изменяется не только по значению, но и по углу.

3. Учет переходного сопротивления в месте КЗ при различных режимах показал, что это сопротивление на зажимах ДЗ также может быть комплексной величиной. Это приводит к уточнению расчетов уставок ИО сопротивлений по оси R и углов наклона соответствующих отрезков характеристик.

4. Анализ нагрузочных режимов электрической сети с двусторонним питанием привел к уточнению области «выреза нагрузки». Эта область располагается не по оси R , как предлагают производители ДЗ, а по оси R_1 , которая имеет соответствующий угол наклона к оси R .

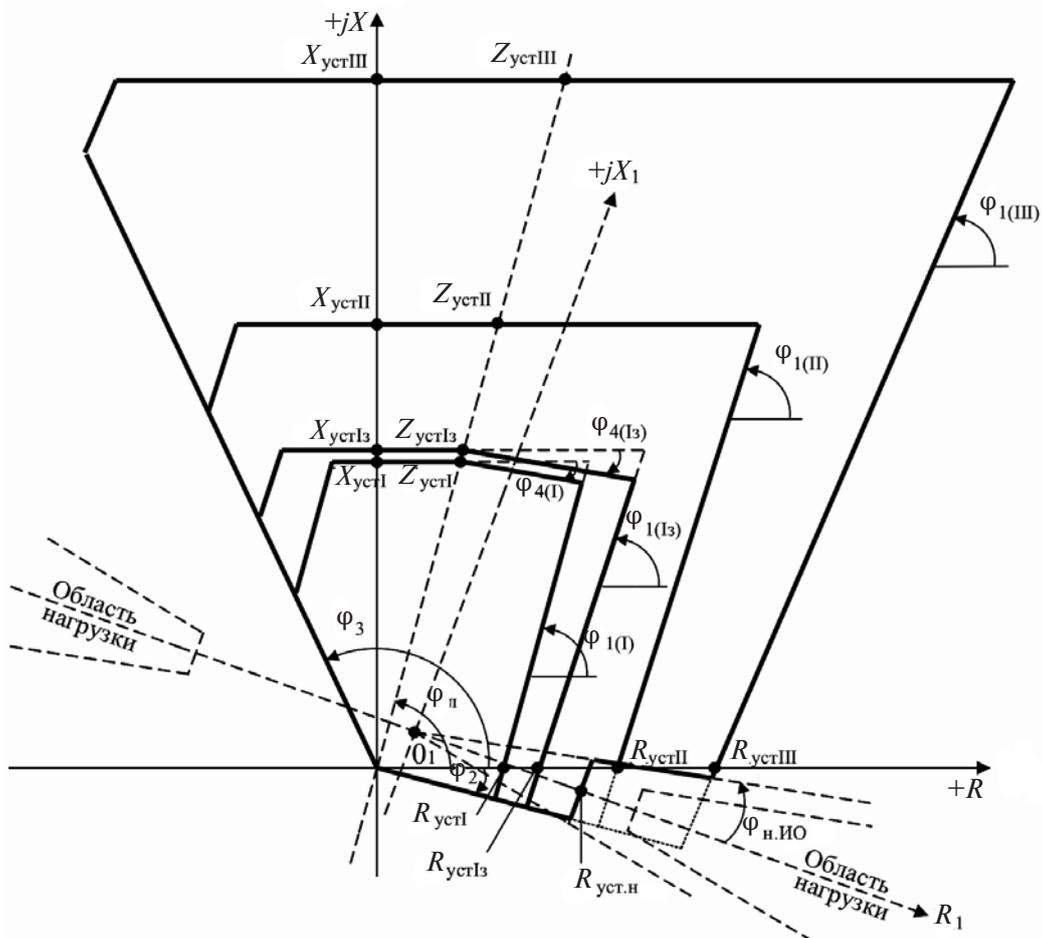


Рис. 7. Предлагаемые характеристики ИО сопротивления ДЗ

5. Учет подпитки КЗ и переходного сопротивления в месте КЗ позволяет повысить чувствительность, а учет нагрузочных режимов приводит к повышению селективности ДЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федосеев А.М., Федосеев М.А.** Релейная защита электроэнергетических систем: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1992.
2. **Руководящие** указания по релейной защите. Вып. 7. Дистанционная защита линий 35—330 кВ. — М.: Энергия, 1966.
3. **Руководящие** указания по релейной защите. Вып. 7 (дополнение). Дистанционная защита линий 35—330 кВ. — М.: Энергия, 1966.
4. **Удрис А.П.** Релейная защита воздушных линий 110—220 кВ типа ЭПЗ-1636. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
5. **Бирг А.Н., Нудельман Г.С., Федоров Э.К. и др.** Устройства дистанционной и токовой защит типов ШДЭ 2801, ШДЭ 2802. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
6. **Шкаф** защиты линии и автоматики управления выключателем типа ШЭ2607 016. — Руководство по эксплуатации (ЭКРА. 656453ю050 РЭ).
7. **Фабрикант В.Л.** Дистанционная защита. — М.: Высшая школа, 1978.
8. **Шнеерсон Э.М.** Дистанционные защиты. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
9. **Фабрикант В.Л.** основы теории построения измерительных органов релейной защиты и автоматики. — М.: Высшая школа, 1968.
10. **Шнеерсон Э.М.** Цифровая релейная защита. — М.: Энергоатомиздат, 2007.
11. **Циглер Г.** Цифровая дистанционная защита: принципы и применение. — М.: Энергоиздат, 2005.
12. **Аржаников Е.А.** Дистанционный принцип в релейной защите и автоматике линий при замыканиях на землю. — М.: Энергоатомиздат, 1985.

[13.07.12]

*Авторы: **Гарке Владимир Георгиевич** окончил Иркутский политехнический институт в 1963 г. В 1991 г. в Рижском техническом университете была присвоена ученая степень доктора техн. наук за работы по теме «Быстродействующие органы дистанционной защиты». Профессор кафедры электрооборудования Казанского национального исследовательского технического университета (КНИТУ) им. А.Н. Туполева. Скончался в 2012 г.*

***Конова Елена Александровна** окончила Казанский государственный энергетический университет по кафедре релейной защиты и автоматизации электроэнергетических систем в 2009 г. Аспирант кафедры электрооборудования КНИТУ им. А.Н. Туполева.*