

УДК 621.316.925

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ ЛИНИЙ 6–10–35 кВ

Докт. техн. наук, доц. РОМАНИЮК Ф. А., докт. техн. наук, проф. НОВАШ В. И.,
канд. техн. наук, доц. ТИШЕЧКИН А. А.,
инженеры КУЦЫЛО А. В., ЧЕРНЫШЕВИЧ А. В.

Белорусская государственная политехническая академия

Дистанционный принцип выполнения релейной защиты [1] обладает большими возможностями в обеспечении чувствительности и селективности защит линий электропередачи, что объясняется наиболее полноценным использованием входной информации о режиме защищаемой линии. Цифровая реализация дистанционного принципа в значительной степени уменьшает недостаток аналоговых дистанционных защит, заключающийся в сложности аппаратного исполнения. Это создает перспективы более широкого использования дистанционного принципа в цифровых защитах распределительных сетей 6–10–35 кВ.

Применение дистанционных защит на линиях 6–10–35 кВ целесообразно в следующих случаях:

линии относительно небольшой длины, для которых отношение токов КЗ в начале и конце линии не превышает 1,5–2, вследствие чего защитоспособность токовых отсечек мгновенного действия недостаточна или вообще отсутствует;

протяженные участки линий, работающие с большими нагрузками, на которых чувствительность токовых ступеней дальнего резервирования оказывается недостаточной.

Быстродействующие ступени дистанционных защит всегда обладают большей защитоспособностью по сравнению с токовыми отсечками, поэтому применение двух- и трехступенчатой дистанционной защиты на линиях 6–10–35 кВ можно считать целесообразным в любом из приведенных выше случаев. Следует отметить, что на линиях 6–35 кВ с двухсторонним питанием цифровые дистанционные защиты не намного сложнее направленных токовых защит и могут оказаться предпочтительнее в любых случаях.

В настоящей статье производится предварительная качественная оценка характеристик измерительных органов (ИО) сопротивления для использования в цифровых дистанционных защитах линий 6–10–35 кВ.

Измерительный орган сопротивления — функциональный элемент дистанционной защиты, вырабатывающий одноразрядный двоичный сигнал о положении вектора входного сопротивления линии по отношению к области срабатывания на комплексной плоскости сопротивлений. Линия, ограничивающая область срабатывания, является характеристикой ИО сопротивления в комплексной плоскости. В аналоговых дистанционных защитах ИО сопротивления — это электрический аппарат (реле), в цифровых защитах — программный блок, группа операторов в программе, реализующей алгоритм функционирования защиты.

Ниже рассматриваются алгоритмы ИО сопротивления с явным определением вектора входного сопротивления линии $Z_{ВХ}$ или его активной и реактивной составляющих $R_{ВХ}$, $X_{ВХ}$ и последующим выявлением попадания или непопадания этого вектора в заданную область срабатывания на комплексной плоскости сопротивлений. Величина входного сопротивления может быть использована для определения расстояния до места КЗ, что является дополнительным преимуществом цифровой дистанционной защиты.

Характеристика ИО сопротивления должна охватывать всю область возможного нахождения вектора входного сопротивления линии $Z_{ВХ}$ при КЗ в заданной зоне действия защиты, определяемого с учетом погрешностей измерительных трансформаторов, переходных сопротивлений в месте КЗ и т. п.

Область срабатывания ИО сопротивления направленного действия не должна охватывать точек в третьем квадранте плоскости входных сопротивлений. Это усложняет алгоритм функционирования ИО направленного действия, который к тому же имеет зону неопределенного действия («мертвая» зона) при близких даже двухфазных КЗ, устранение которой требует дополнительных мероприятий. В настоящей работе наряду с направленными ИО сопротивления рассматриваются ИО сопротивления с характеристиками, охватывающими часть третьего квадранта комплексной плоскости вблизи к началу координат, направленность действия которых обеспечивается трехфазным ИО направления мощности, не имеющим «мертвой» зоны при двухфазных КЗ.

Предварительная оценка характеристик ИО сопротивления производится по отношению к входным сопротивлениям, определяемым по первичным токам и напряжениям линии:

$$Z_{ВХ} = \frac{\dot{U}_к}{\dot{I}_к},$$

где $\dot{U}_к$ — вектор линейного напряжения замкнувшихся фаз в месте установки защиты;

$\dot{I}_к$ — вектор разности фазных токов петли КЗ.

Важнейшие требования к характеристикам ИО сопротивления — минимальная избыточность области срабатывания и простота алгоритма условий срабатывания. Эти требования, как правило, противоречивы.

ИО с характеристиками в виде окружностей, относительно просто реализуемые аппаратными средствами, в цифровых защитах использовать нецелесообразно. Их основным недостатком является значительное сокращение зоны действия при наличии переходного сопротивления в месте КЗ. Достоинство ненаправленного ИО сопротивления с круговой

характеристикой, заключающееся в простоте условия срабатывания, в цифровых защитах не является решающим.

Основная отличительная особенность линий 6–10 кВ, определяющая форму области срабатывания ИО сопротивления – относительно низкие значения фазового угла сопротивления линии 30–45 градусов для воздушных линий и еще меньше для кабельных. Эта особенность также является обстоятельством не в пользу круговых характеристик для цифровых ИО сопротивления линий 6–10–35 кВ.

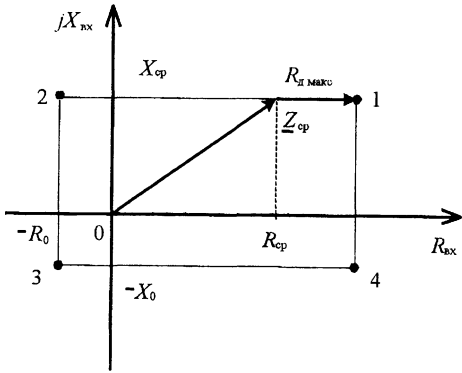


Рис. 1

Наиболее простую алгоритмическую реализацию имеет прямоугольная характеристика, симметричная относительно осей координат. Однако на линиях с двухсторонним питанием по ряду соображений [2] она должна иметь ограничения в области отрицательных значений $R_{вх}$, $X_{вх}$ (рис. 1). Координаты точек, определяющие границу области срабатывания 1-2-3-4 (особые точки характеристики):

$$\begin{aligned} R_1 &= R_{ср} + R_{д\ макс}, & X_1 &= X_{ср}; \\ R_2 &= -R_0, & X_2 &= X_{ср}; \\ R_3 &= -R_0, & X_3 &= -X_0; \\ R_4 &= R_{ср} + R_{д\ макс}, & X_4 &= -X_0. \end{aligned}$$

Здесь $R_{ср}$, $X_{ср}$ – параметры срабатывания при металлическом КЗ;

R_0 , X_0 – то же, ограничения области срабатывания;

$R_{д\ макс}$ – максимальное значение переходного сопротивления в конце зоны действия, при котором ИО должен срабатывать.

ИО сопротивления с прямоугольными характеристиками могут выполняться для любых ступеней защиты преимущественно для кабельных линий. Направленность действия должна обеспечиваться отдельными органами направления мощности.

Условия срабатывания ИО определяются истинностью логического выражения

$$A \text{ И } B \text{ И } C,$$

где A – истинность соотношения $-R_0 < R_{вх} \leq R_1$;

B – то же, соотношения $-X_0 < X_{вх} \leq X_1$;

C – то же, выполнения условий направления мощности от шин в сторону линии.

В процессе исследования должны быть уточнены условия определения величин R_0 , X_0 , $R_{д\ макс}$ при различных значениях $R_{д}$ и местах КЗ, включая КЗ за спиной защиты.

Для отстройки защиты от тяжелых нагрузочных режимов область срабатывания ИО сопротивления II–III ступеней защиты должна иметь ограничение в нижней части первого квадранта комплексной плоскости

сопротивлений. Обычно для этого правый отрезок характеристики выполняется наклонным, а в некоторых защитах существует даже прямоугольная вырезка.

Частным случаем улучшения прямоугольной характеристики является треугольная характеристика, представленная на рис. 2. Правый отрезок характеристики имеет наклон к оси абсцисс такой же, как и у вектора входного сопротивления линии, т. е. $\varphi_{л} = \arctg\left(\frac{X_{л}}{R_{л}}\right)$. Такая

характеристика обеспечивает срабатывание ИО при КЗ через переходное сопротивление. В защитах линий 110 кВ и выше угол наклона правого участка характеристики к оси абсцисс принимается меньше угла $\varphi_{л}$ с учетом того, что при близких КЗ с большими токами нелинейное сопротивление дуги меньше, чем при удаленных КЗ.

Координаты особых точек характеристики:

$$R_1 = R_{ср} + R_{д макс}, \quad X_1 = X_{ср};$$

$$R_2 = -R_0, \quad X_2 = X_{ср};$$

$$R_3 = -R_0, \quad X_3 = (R_{д макс} + R_0) \operatorname{tg}(\varphi_{л}) = (R_{д макс} + R_0) \frac{X_{ср}}{R_{ср}} \text{ (модуль)}.$$

Условия срабатывания — истинность логического выражения $A_1 \text{ И } B_1 \text{ И } C$, где

$$-R_0 < R_{вх} \leq \left[R_1 - (R_1 + R_0) \frac{X_{ср} - X_{вх}}{X_{ср} + X_3} \right]; \quad (A_1)$$

$$X_{ср} \geq X_{вх} \geq \left[-X_3 + (X_{ср} + X_3) \frac{R_0 + R_{вх}}{R_0 + R_1} \right]. \quad (B_1)$$

Параметр C — сигнал о направлении мощности от шины в сторону защищаемой линии, вырабатываемый соответствующим ИО.

Более компактной (с меньшей избыточностью области срабатывания) является треугольная характеристика, приведенная на рис. 3. Координаты особых точек 1, 2 — те же, что и для характеристик рис. 1, 2. Координаты особой точки 3:

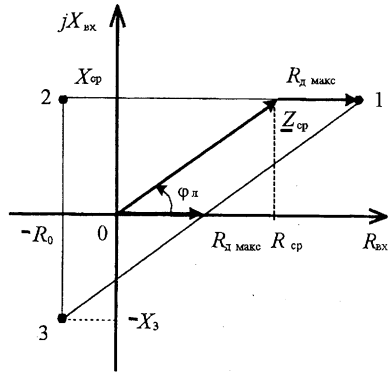


Рис. 2

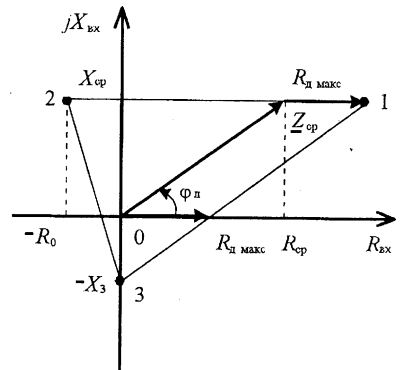


Рис. 3

$$R_3 = 0, \quad X_3 = R_{\text{д макс}} \frac{X_{\text{ср}}}{R_{\text{ср}}} \text{ (модуль)}.$$

Алгоритм условия срабатывания — истинность логического выражения $A_2 \text{ И } B_2 \text{ И } C$, где

$$-R_0 \frac{X_{\text{вх}} + X_3}{X_{\text{ср}} + X_3} < R_{\text{вх}} \leq R_1 \frac{X_{\text{вх}} + X_3}{X_{\text{ср}} + X_3}; \quad (A_2)$$

$$X_{\text{ср}} \geq X_{\text{вх}} > \left[X_{\text{ср}} - (X_{\text{ср}} + X_3) \frac{R_1 - R_{\text{вх}}}{R_1} \right] \text{ при } R_{\text{вх}} > 0; \quad (B_2)$$

$$X_{\text{ср}} \geq X_{\text{вх}} > \left[X_{\text{ср}} - (X_{\text{ср}} + X_3) \frac{R_0 + R_{\text{вх}}}{R_0} \right] \text{ при } R_{\text{вх}} < 0.$$

Алгоритмы условий срабатывания ИО с характеристиками рис. 2, 3 по количеству вычислительных операций мало различимы. В процессе исследования предстоит сравнить эти характеристики и оценить величину параметра R_0 применительно к конкретным условиям сетей 6–10–35 кВ.

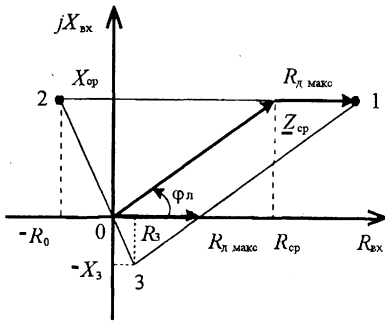


Рис. 4

В характеристике ИО сопротивления, обладающего направленностью действия, отрезок 2–3 должен проходить через начало координат (рис. 4). Координаты особых точек характеристики 1, 2 те же, что и в характеристиках направленных ИО сопротивления. Абсолютные значения координат особой точки 3:

$$R_3 = R_{\text{д макс}} \left(1 - \frac{R_{\text{ср}}^2}{R_{\text{ср}}^2 + X_{\text{ср}} R_0} \right);$$

$$X_3 = R_{\text{д макс}} \frac{R_{\text{ср}} X_{\text{ср}}}{R_{\text{ср}}^2 + X_{\text{ср}} R_0}.$$

Условия срабатывания — истинность логического выражения $A_3 \text{ И } B_3$, где

$$\left[-R_0 + (R_0 + R_3) \frac{X_{\text{ср}} - X_{\text{вх}}}{X_{\text{ср}} + X_3} \right] < R_{\text{вх}} \leq \left[R_1 - (R_1 - R_3) \frac{X_{\text{ср}} - X_{\text{вх}}}{X_{\text{ср}} + X_3} \right]; \quad (A_3)$$

$$X_{cp} \geq X_{bx} > \left[X_{cp} - (X_{cp} + X_3) \frac{R_1 - R_{bx}}{R_1} \right] \text{ при } R_{bx} \geq R_3; \quad (B_3)$$

$$X_{cp} \geq X_{bx} > \left[X_{cp} - (X_{cp} + X_3) \frac{R_0 + R_{bx}}{R_0} \right] \text{ при } R_{bx} < R_3.$$

Направленность действия обеспечивается тем, что в область срабатывания, ограниченную характеристикой рис. 4, не входят точки III квадранта. Однако векторы входных сопротивлений защищаемой линии при КЗ за спиной защиты вследствие подпитки места КЗ, влияния переходных сопротивлений и других факторов могут попадать во II, IV квадранты, что вызывает неселективное срабатывание ИО. Эти вопросы составляют предмет самостоятельного исследования методом вычислительного эксперимента. Вопросы обеспечения направленности действия при близких КЗ, когда $X_{bx} \approx 0$; $R_{bx} \approx 0$, также должны составлять предмет самостоятельного исследования и в настоящей работе не рассматриваются.

Алгоритмы функционирования трехфазного ИО направления мощности основаны на известной 90- или 120-градусной схеме. Сигнал о направлении мощности от шин в сторону защищаемой линии вырабатывается таким ИО, если угол между векторами двух сочетаний тока и напряжения находится в диапазоне

$$\varphi_{н.ч.} - 90^\circ < \psi_{IU} \leq \varphi_{н.ч.} + 90^\circ.$$

В 90-градусной схеме используются сочетания токов и напряжений $\dot{I}_A - \dot{U}_{BC}$; $\dot{I}_B - \dot{U}_{CA}$; $\dot{I}_C - \dot{U}_{AB}$, угол наибольшей чувствительности для линий 35—110 кВ — 30—45 градусов при опережающем токе, для воздушных линий с меньшими сечениями проводов угол наибольшей чувствительности — 45—60 градусов. В 120-градусной схеме сочетания токов и напряжений $\dot{I}_{AB} - \dot{U}_{BC}$; $\dot{I}_{BC} - \dot{U}_{CA}$; $\dot{I}_{CA} - \dot{U}_{AB}$, где \dot{I}_{AB} , \dot{I}_{BC} , \dot{I}_{CA} — разности токов фаз, указанных в индексах, угол наибольшей чувствительности для воздушных линий 6—10 кВ с относительно малыми сечениями — около 70—95 градусов при опережающем токе.

Угол между векторами токов и напряжений для каждого момента времени может быть определен непосредственно по ортогональным составляющим [3] без вычисления начальных фаз отдельных векторов:

$$\psi_{IU} = \arcsin\left(\frac{u_{snI}u_{csU} - u_{snU}u_{csI}}{2UI} \cdot \frac{180}{\pi}\right) \text{ град.}$$

Если $u_{csI}u_{csU} + u_{snI}u_{snU} < 0$, то $\psi_{IU} = 180^\circ - \psi_{IU}$.

Здесь u_{csU} , u_{snU} — ортогональные составляющие напряжений;

u_{csI} , u_{snI} — то же, токов.

Достоинство 120-градусной схемы заключается в том, что для определения угла ψ_{IU} используются те же ортогональные составляющие раз-

ностей фазных токов, что и в алгоритмах ИО сопротивления. Ее слабым местом является различие значений угла наибольшей чувствительности при двух- и трехфазных КЗ. Метод вычислительного эксперимента позволяет уточнить диапазоны срабатывания ИО направления мощности для этих схем и произвести оценку их стабильности при различных значениях переходных сопротивлений, влияния подпитки места и вида КЗ.

Анализ алгоритмов определения входных сопротивлений линии как последовательностей математических операций с цифровыми значениями токов и напряжений в месте установки защиты применительно к линиям 6–35 кВ является предметом специального исследования.

ВЫВОДЫ

1. В цифровых дистанционных защитах распределительных сетей 6–10–35 кВ целесообразно использование ИО сопротивления с прямо- и треугольными характеристиками, вытянутыми вдоль оси активных сопротивлений для повышения чувствительности к коротким замыканиям через переходные сопротивления.

2. На линиях 6–10–35 кВ с двухсторонним питанием представляет интерес использование ненаправленных ИО сопротивления с отдельными трехфазными ИО направления мощности, не имеющими «мертвой» зоны при двухфазных КЗ.

3. В быстродействующих ступенях дистанционных защит целесообразно использование ИО сопротивления с прямоугольными характеристиками, отличающихся простыми условиями срабатывания, в ступенях дальнего резервирования линий, работающих с большими нагрузками, – ИО с треугольными характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федосеев А. М., Федосеев М. А. Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.
2. Шнейерсон Э. М. Дистанционные защиты. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.
3. Романюк Ф. А., Нагорная Е. А. Формирование ортогональных составляющих входных сигналов релейной защиты // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1996. – № 7–8. – С. 16–21.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 1.02.2001