

УДК 621.313.333

## СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СРАБАТЫВАНИЯ ЦИФРОВОГО РЕЛЕ ПРИ ВЫБОРЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА НАПРЯЖЕНИЕМ 6(10)/0,4 КВ

**В.В. КУРГАНОВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П.О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

В настоящее время на вновь строящихся и реконструируемых электрических подстанциях применяются современные микропроцессорные системы защиты (цифровые реле) типов Seram 2000, Spac 800, БМРЗ и др. В цифровых реле запрограммировано большое число функций защит с различными характеристиками срабатывания, при этом не увеличивается аппаратная избыточность устройства, что невозможно выполнить в аналоговых защитах. На практике при внедрении цифрового реле, как правило, без предварительного анализа используют такую же защитную характеристику, как и в аналоговых защитах, ранее применявшихся на данном защищаемом объекте. Вместе с тем, подбор оптимальной защитной характеристики позволяет не только увеличить быстродействие защиты, но и повысить ее чувствительность и селективность. Максимальная токовая защита (МТЗ) трансформаторов напряжением 6(10)/0,4 кВ в аналоговом варианте, как правило, выполнялась с независимой от тока выдержкой времени, равной 0,5 с (реле РТ-40). Применение для этой цели индукционного реле РТ-80 не дает преимуществ, поскольку минимальное время его срабатывания не может быть меньше 0,5 с. Введение выдержки времени срабатывания в МТЗ необходимо для обеспечения селективности с автоматическим выключателем (автоматом) ввода на стороне 0,4 кВ. На рис. 1 приведена расчетная схема защиты трансформатора мощностью 400 кВА, в которой указаны значения токов коротких замыканий (КЗ) на сторонах ВН и НН. На стороне 0,4 кВ трансформатора применен автомат SF типа BA55(75) с полупроводниковым расцепителем, а на выключателе Q (сторона ВН) – комплект защит на цифровом реле типа Seram 2000-T09. Максимальная токовая защита в реле Seram содержит набор следующих защитных характеристик, соответствующих стандарту МЭК 225-4: независимая характеристика (функция DT); нормальная обратнoзависимая от тока (ОЗТ) характеристика (функция SIT); очень зависимая (VIT), чрезвычайно зависимая (EIT) и ультразависимая (UIT).

Время срабатывания защиты с ОЗТ характеристикой описывается выражением [1]:

$$t_{CЗ} = \frac{\beta T_{уст}}{\gamma(I_*^\alpha - 1)}, \quad (1)$$

где  $I_* = I_{КЗ}/I_{CЗ}$  – кратность тока КЗ ( $I_{КЗ}$ ) к току срабатывания защиты;  $T_{уст}$  – уставка защиты по времени, соответствующая 10-ти кратному току, с;  $\alpha, \beta, \gamma$  –

постоянные коэффициенты, равные следующим значениям для стандартных характеристик:

типа СИТ –  $\alpha = 0,02$ ;  $\beta = 0,14$ ;  $\gamma = 2,97$ ;

типа ВИТ –  $\alpha = 1$ ;  $\beta = 13,5$ ;  $\gamma = 1,5$ ;

типа ЕИТ –  $\alpha = 2$ ;  $\beta = 80$ ;  $\gamma = 0,808$ ;

типа УИТ –  $\alpha = 2,5$ ;  $\beta = 315$ ;  $\gamma = 1$ .

Каждая ОЗТ характеристика имеет ограничение по току срабатывания (при  $I_* < 1,2$   $t_{сз} = \infty$ ) и по времени (при  $I_* = 20$   $t_{сз} \geq 0,1$  с, причем при  $I_* > 20$  время срабатывания соответствует кратности  $I_* = 20$ ).

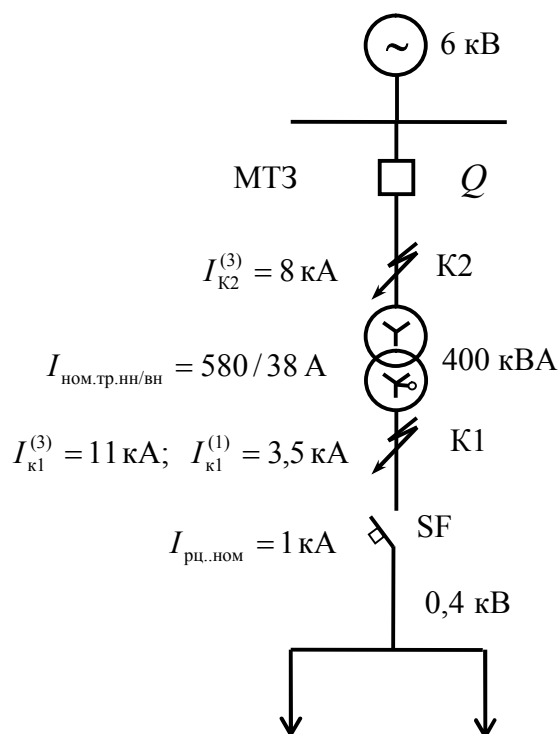


Рис. 1. Расчетная схема защиты трансформатора

Порядок расчета уставок защит и выбор их характеристик следующий. Ток срабатывания МТЗ трансформатора (уставка по току) выбирается по классической формуле [2]:

$$I_{сз} = k_H k_{сзп} I_{РАБ.МАХ} / k_B,$$

где  $k_H$ ,  $k_B$ ,  $k_{сзп}$  – соответственно коэффициенты надежности, возврата и самозапуска.

Если применить независимую характеристику срабатывания (ДТ), то значение  $k_{сзп} = 2,3$  и тогда  $I_{сз} = 1,1 \cdot 2,3 \cdot 38 / 0,96 = 100$  А.

При использовании ОЗТ характеристики значение  $k_{сзп} = 1$ , поскольку в режиме перегрузки время срабатывания защиты на границе уставки ( $I_* = 1,2$ ) составляет несколько десятков секунд, тогда как время самозапуска двигателей в сетях 0,4 кВ не превышает 4 с. Однако в этом случае необходимо учитывать длительно

допустимый ток перегрузки трансформатора, который можно принять равным 160 % номинального тока:

$$I_{C3} = 1,1 \cdot 1,6 \cdot 38 / 0,96 = 70 \text{ А.}$$

Следует отметить, что за счет ограничения ОЗТ характеристики по току минимальный ток срабатывания защиты составит  $1,2 \cdot 70 = 84 \text{ А}$ .

Для выбора уставки по времени ( $T_{уст}$ ) необходимо построить карту селективности, которая приведена на рис. 2. При ее построении нужно знать параметры срабатывания автоматического выключателя ввода 0,4 кВ (SF). Номинальный ток срабатывания расцепителя для автомата ВА55(75) выбирается по условию:

$$I_{PЦ,НОМ} \geq 1,1 \cdot I_{РАБ,МАХ} = 1,1 \cdot 1,6 \cdot 580 = 1020 \text{ А.}$$

Принимаем ближайший по стандартной шкале  $I_{PЦ,НОМ} = 1 \text{ кА}$ . Диапазон кратностей уставок токовой отсечки указанных автоматов составляет  $I_* = 2, 3, 5, 7, 10$ . Принимаем  $I_* = 2$ , т. е.  $I_{PЦ,ТР} = 2 \text{ кА}$ , поскольку значение тока однофазного КЗ на стороне 0,4 кВ составляет 3,5 кА.

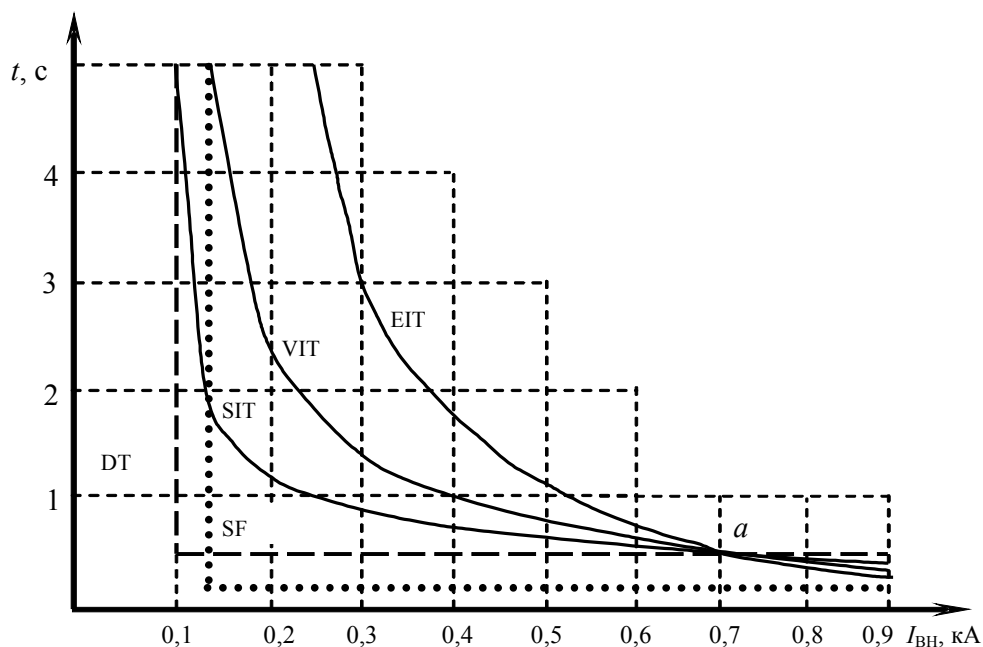


Рис. 2. Карта селективности защит

На карте селективности (рис. 2) строится защитная характеристика автомата SF в масштабе значений токов, приведенных к стороне ВН. На границе тока срабатывания отсечки время срабатывания автомата превышает 20 с, что выходит за пределы графика. При кратности тока  $I_* > 2$  время срабатывания отсечки селективного автомата можно выставить равным 0,1; 0,2; 0,3 с. В нашем примере принято время 0,2 с. Штрихпунктирными линиями показана МТЗ с независимой (DT) характеристикой срабатывания ( $I_{C3} = 100 \text{ А}$ ;  $t_{C3} = 0,5 \text{ с}$ ).

Порядок построения обратозависимых характеристик следующий. В начале определяются координаты расчетной точки «а», через которую должны проходить рассматриваемые ОЗТ характеристики. Для данной точки абсциссой является максимальный трехфазный ток КЗ на шинах 0,4 кВ, приведенный к стороне ВН:

$$I_{"а"} = I_{к1.ВН}^{(3)} = I_{к1}^{(3)} / k_{ТР} = 11/15 = 0,73 \text{ кА.}$$

Ордината времени точки «а» определяется как

$$t_{"а"} = t_{РЦТО} + \Delta t = 0,2 + 0,3 = 0,5 \text{ с,}$$

где  $\Delta t$  – степень селективности.

1. Применяем МТЗ с нормальной ОЗТ характеристикой (SIT):

Из (1) определим уставку по времени:

$$T_{УСТ} = t_{"а"} \cdot 2,97 \cdot (I_*^{0,02} - 1) / 0,14 = 0,5 \cdot 2,97(10,4^{0,02} - 1) / 0,14 = 0,508 \text{ с,}$$

где  $I_* = I_{к1.ВН}^{(3)} / I_{СЗ} = 730/70 = 10,4$ .

При дискретности уставок 0,01 с значение  $T_{УСТ} = 0,51 \text{ с}$ .

Для построения кривой (SIT) определяется время срабатывания защиты по (1) при различных произвольно заданных значений кратности  $I_*$ :

$$I_* = 1,2 \quad (84 \text{ А}) \quad t_{СЗ} = 0,14 \cdot 0,51 / 2,97(1,2^{0,02} - 1) = 6,6 \text{ с.}$$

$$I_* = 1,9 \quad (133 \text{ А}) \quad t_{СЗ} = 1,9 \text{ с; } I_* = 2,21 \quad (155 \text{ А}) \quad t_{СЗ} = 1,5 \text{ с.}$$

$$I_* = 4,28 \quad (300 \text{ А}) \quad t_{СЗ} = 0,81 \text{ с; } I_* = 20 \quad (1400 \text{ А}) \quad t_{СЗ} = 0,39 \text{ с.}$$

На рис. 2 нормальная ОЗТ характеристика изображена кривой SIT.

2. Применяем чрезвычайную ОЗТ характеристику EIT:

$$T_{УСТ} = t_{"а"} \cdot 0,808(I_*^2 - 1) / 80 = 0,5 \cdot 0,808(10,4^2 - 1) / 80 = 0,54 \text{ с.}$$

$$I_* = 1,2 \quad (84 \text{ А}) \quad t_{СЗ} = 121 \text{ с; } I_* = 1,9 \quad (133 \text{ А}) \quad t_{СЗ} = 20 \text{ с.}$$

$$I_* = 2,21 \quad (155 \text{ А}) \quad t_{СЗ} = 13,7 \text{ с; } I_* = 4,28 \quad (300 \text{ А}) \quad t_{СЗ} = 3 \text{ с.}$$

$$I_* = 7,14 \quad (500 \text{ А}) \quad t_{СЗ} = 1,07 \text{ с; } I_* = 20 \quad (1400 \text{ А}) \quad t_{СЗ} = 0,13 \text{ с.}$$

На рис. 2 чрезвычайная ОЗТ характеристика изображена кривой EIT.

3. Применяем очень зависимую характеристику VIT:

$$T_{УСТ} = t_{"а"} \cdot 1,5(I_* - 1) / 13,5 = 0,5 \cdot 1,5(10,4 - 1) / 13,5 = 0,52 \text{ с.}$$

$$I_* = 1,2 \quad (84 \text{ А}) \quad t_{СЗ} = 13,5 \cdot 0,52 / 1,5(1,2 - 1) = 23,4 \text{ с.}$$

$$I_* = 1,9 \quad (133 \text{ A}) \quad t_{\text{СЗ}} = 5,2 \text{ с}; \quad I_* = 2,21 \quad (155 \text{ A}) \quad t_{\text{СЗ}} = 3,8 \text{ с.}$$

$$I_* = 4,28 \quad (300 \text{ A}) \quad t_{\text{СЗ}} = 1,4 \text{ с}; \quad I_* = 20 \quad (1400 \text{ A}) \quad t_{\text{СЗ}} = 0,24 \text{ с.}$$

Очень зависимая характеристика изображена на рис. 2 кривой VIТ. Анализируя полученные кривые, можно сделать следующие выводы.

Характеристику СИТ применять нецелесообразно, т. к. она пересекается с характеристикой автомата при относительно малом значении времени 1,9 с, а при КЗ в конце присоединения 6 кВ время срабатывания ее равно 0,39 с, т. е. близко к времени срабатывания независимой характеристики ДТ. Наиболее подходящей является характеристика VIТ, она пересекается с автоматом при времени более 5 с, а при КЗ на линейных выводах ВН трансформатора имеет время срабатывания 0,24 с, т. к.  $I_* = 0,866 \cdot 8000 / 70 = 99 > 20$ . При однофазном КЗ на стороне НН максимальное значение фазного тока на стороне ВН трансформатора составляет  $2I_{\text{кл.ВН}}^{(1)} / 3 = 2 \cdot 3500 / (15 \cdot 3) = 155 \text{ A}$ , а время срабатывания защиты при этом токе равно 3,8 с. Данное время срабатывания для резервной защиты приемлемо, поскольку по условию перегрева трансформатора допустимое время отключения КЗ определяется по выражению [2]:  $t_{\text{доп}} = 1500 / K^2 \leq 15 \text{ с}$ ,  $t_{\text{доп}} = 1500 / 6,03^2 \geq 15 \text{ с}$ , где  $K$  – кратность перегрузки трансформатора; при однофазном КЗ  $K = 3500 / 580 = 6,03$ .

Таким образом, для данного примера на реле Sepam 2000 выбирается защита с характеристикой VIТ и выставляется уставка по току 70 А (первичных) и уставка по времени срабатывания 0,52 с. При этом в последующей защите секционного или вводного выключателя подстанции, питающей данный трансформатор, выдержку времени срабатывания МТЗ принимают:  $t_{\text{посл}} = t_{\text{пред}} + \Delta t = 0,24 + 0,3 = 0,55 \text{ с}$ . При использовании независимой характеристики типа ДТ:  $t_{\text{посл}} = 0,5 + 0,3 = 0,8 \text{ с}$ .

Кроме увеличения быстродействия с применением ОЗТ характеристики повышается чувствительность защиты трансформатора к однофазным КЗ на стороне 0,4 кВ. Коэффициент чувствительности составит:

$$K_{\text{ч}} = 0,667 \cdot I_{\text{кл.ВН}}^{(3)} / I_{\text{СЗ}} = 155 / 70 = 2,21.$$

Для сравнения при использовании независимой характеристики типа ДТ  $K_{\text{ч}} = 155 / 100 = 1,55$ , т. е.  $K_{\text{ч}}$  находится на грани допустимого значения, равного 1,5. Вместе с тем, согласно ПУЭ на трансформаторах малой мощности до 630 кВА допускается не резервировать однофазные замыкания на землю на стороне 0,4 кВ, если это приводит к усложнению защиты. В данном случае усложнения нет и резервирование обеспечивается.

Если в том же примере трансформатор имел бы группу соединений обмоток  $\Delta/\text{Y}$ , то в этом случае ток однофазного КЗ на стороне НН примерно равен току трехфазного КЗ. Тогда ток срабатывания токовой отсечки автомата принимается  $I_{\text{РЦТО}} = 5 \text{ кА}$ . На карте селективности защитная характеристика автомата SF будет смещена вправо до уровня тока  $5 / 15 = 0,333 \text{ кА}$ . Для данного случая наиболее оптимальной является защита с чрезвычайно зависимой характеристикой типа ЕIT, поскольку ее время срабатывания при токе 333 А составляет 2,5 с, а при КЗ на линейных выводах ВН трансформатора  $t_{\text{СЗ}} = 0,13 \text{ с}$ , что позволяет уменьшить

выдержку времени последующей защиты секционного выключателя до значения 0,43 с.

Таким образом, приведенная в статье методика согласования селективности защит позволяет выбрать наиболее оптимальный тип стандартной характеристики цифрового реле. В результате этого уменьшается выдержка времени отключения короткого замыкания и повышается чувствительность максимальной токовой защиты трансформатора 6/0,4 кВ.

### **Литература**

1. Информационные материалы по цифровым реле серии SPACOM, Sepam 2000 и БМРЗ.
2. Шабад, М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей /М.А. Шабад. – Л.: Энергоатомиздат, 1985.

*Получено 17.11.2004 г.*