

УДК 621.316.125

МЕТОД РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ЗА ТРАНСФОРМАТОРОМ С БОЛЬШИМ ДИАПАЗОНОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

В. В. КУРГАНОВ

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

Введение

В известном методе расчета токов короткого замыкания (КЗ) за трансформатором с большим диапазоном регулирования напряжения приняты допущения, согласно которым сопротивления трансформатора определяются при крайних положениях регулятора напряжения типа РПН [2], [3]. Это приводит к необоснованному расширению диапазона расчетных значений токов КЗ, что в свою очередь, с одной стороны, увеличивает ток небаланса дифференциальной защиты трансформатора, с другой стороны снижает чувствительность релейной защиты. Предлагаемый метод расчета токов КЗ устраняет указанный недостаток.

Постановка задачи

Обмотка высокого напряжения (ВН) мощных понижающих трансформаторов со стороны нейтрали оснащена регулятором напряжения под нагрузкой (РПН). При наличии РПН напряжение на стороне низкого напряжения (НН) трансформатора поддерживается равным номинальному (или близкое к нему) независимо от изменения питающего напряжения на стороне ВН. Это достигается за счет автоматического регулирования коэффициента трансформации трансформатора.

Диапазон регулирования напряжения отечественных трансформаторов, работающих в сетях $U_{с.ном} = 110$ кВ, составляет $\Delta U = \pm 16\%$ ($9 \times 1,78$) номинального напряжения обмотки ВН, соответствующего среднему положению переключателя РПН, т. е. 115 кВ. При крайних положениях переключателя РПН абсолютное значение напряжения обмотки ВН изменяется в диапазоне:

$$U_{ВН.мин} = U_{Т.ср} (1 - \Delta U^*) = 115(1 - 0,16) = 96,6 \text{ кВ};$$

$$U_{ВН.макс} = U_{Т.ср} (1 + \Delta U^*) = 115(1 + 0,16) = 133,4 \text{ кВ}.$$

Однако в сетях 110 кВ диапазон изменения рабочего напряжения значительно меньше. С одной стороны, максимальное рабочее напряжение по условию изоляции ограничено значением $U_{с.макс} = 126$ кВ, что на 10 % больше номинального напряжения обмотки ВН. С другой стороны в соответствии со стандартом на качество электрической энергии минимальное напряжение в кратковременном режиме не должно снижаться более, чем на 10 %, т. е. $U_{с.мин} = 115 \cdot 0,9 = 103$ кВ. Следовательно, весь диапазон регулятора РПН $\Delta U = \pm 16\%$ практически не может быть использован, так как вряд ли может возникнуть необходимость держать на шинах ВН питающей подстанции напряжение значительно ниже номинального и тем более выше допустимого.

В последнее время в отечественных электроэнергетических системах и на подстанциях крупных промышленных предприятий стали применяться трансформаторы зарубежных фирм, например, типа *TNORD-16000/115/11* или *TNARE-25000/115/6,3 PN* фирмы *ABB*. У них диапазон регулирования напряжения РПН составляет $\Delta U = \pm 10\% (8 \times 1,25)$, т. е. полностью укладывается в отведенный диапазон изменения рабочего напряжения в сетях 110 кВ.

Известно, что каждому ответвлению (положению) переключателя РПН соответствует определенное напряжение короткого замыкания трансформатора (u_k) и соответствующее ему сопротивление трансформатора [2]. В паспортах и каталогах на типовые трансформаторы приведены напряжения короткого замыкания при среднем положении переключателя РПН $u_{k,ср}$ и при двух крайних положениях $u_{k,мин}$ и $u_{k,макс}$, соответственно для напряжений обмотки ВН $U_{ВН,мин} = 96,6$ кВ и $U_{ВН,макс} = 133,4$ кВ [4].

Расчет значений сопротивления трансформатора с учетом влияния РПН согласно известной методике выполняют по выражениям [2], [3]:

$$x_{T,мин} = \frac{u_{k,мин} [U_{T,ср} (1 - \Delta U^*)]^2}{100 \cdot S_{T,ном}}; \quad x_{T,макс} = \frac{u_{k,макс} \cdot U_{с,макс}^2}{100 \cdot S_{T,ном}}. \quad (1)$$

В данных выражениях значения $u_{k,мин}$ и $u_{k,макс}$ приняты при крайних положениях регулятора РПН (паспортные данные). При этом приняты следующие допущения: максимальное напряжение обмотки ВН трансформатора принимается $U_{с,макс} = 126$ кВ (в тоже время $u_{k,макс}$ соответствует напряжению 133,4 кВ), а вместо минимально возможного напряжения в сети $U_{с,мин} = 103$ кВ принимается значение $U_{T,ср} (1 - \Delta U^*) = 96,6$ кВ. Все это связано, как показано в [3], с упрощением расчета, а ожидаемое расширение диапазона изменения значений токов КЗ под влиянием РПН идет в запас надежности.

Принятые допущения, как будет показано ниже, необоснованно загроубляют релейную защиту трансформатора.

Уточненный расчет токов КЗ. Определим значения $u_{k,мин}$ и $u_{k,макс}$ для реального диапазона изменения напряжения в сети 110 кВ.

Переключатель РПН с диапазоном регулирования $\Delta U = \pm 16\%$ имеет 9 ответвлений в положительную сторону и 9 в отрицательную. Каждому ответвлению соответствует изменение напряжения $\alpha = 16/9 = 1,78\%$. Абсолютное значение изменения напряжения, соответствующее одной ступени регулирования, составляет:

$$\Delta U_{N1} = U_{T,ср} \cdot \alpha / 100 = 115 \cdot 1,78 / 100 = 2,047 \text{ кВ}.$$

Напряжению $U_{с,макс} = 126$ кВ соответствует ответвление с номером:

$$N_+ = (U_{с,макс} - U_{T,ср}) / \Delta U_{N1} = (126 - 115) / 2,047 = 5,37.$$

Ближайшее целое число номера положительного ответвления $N_+ = + 5$.

Этому ответвлению соответствует максимальное напряжение трансформатора:

$$U_{T,макс} = U_{T,ср} + N_+ \cdot \Delta U_{N1} = 115 + 5 \cdot 2,047 = 125,2 \text{ кВ}.$$

Аналогично, напряжению $U_{с,мин} = 103$ кВ соответствует ответвление с номером:

$$N_- = (U_{с,мин} - U_{T,ср}) / \Delta U_{N1} = (103 - 115) / 2,047 = -5,86.$$

Ближайшее целое число номера отрицательного ответвления $N_- = -6$.
Ему соответствует минимальное напряжение трансформатора:

$$U_{T.мин} = U_{T.ср} + N_- \cdot \Delta U_{N1} = 115 - 6 \cdot 2,047 = 102,7 \text{ кВ.}$$

Коэффициент трансформации трансформатора изменяется в пределах:

$$K_{T.макс} = U_{T.макс} / U_{НН.ном}; \quad K_{T.мин} = U_{T.мин} / U_{НН.ном}. \quad (2)$$

Например, при номинальном напряжении обмотки НН трансформатора, равном $U_{НН.ном} = 11$ кВ значения максимального и минимального коэффициентов трансформации составят:

$$K_{T.макс} = 125,2 / 11 = 11,38; \quad K_{T.мин} = 102,7 / 11 = 9,34.$$

Отметим, что потеря напряжения в трансформаторе от токов нагрузки в приведенных расчетах не учитывается. Величина потери при нормальном режиме работы подстанции не превышает 5 %, т. е. напряжение на шинах НН держится на уровне 10,5 кВ при номинальном коэффициенте трансформации $K_{T.ном} = 115 / 11 = 10,45$.

Напряжение короткого замыкания трансформатора (u_k) на всех промежуточных ответвлениях N можно определить исходя из линейной интерполяции между значениями u_k при среднем (номинальном) и соответствующем крайнем ответвлении [2]:

$$u_{k.N_+} = u_{k.ср} - \frac{N_+}{N_{кр}} (u_{k.ср} - u_{k.мин}); \quad u_{k.N_-} = u_{k.ср} + \frac{N_-}{N_{кр}} (u_{k.макс} - u_{k.ср}), \quad (3)$$

где $N_{кр}$ – номер крайнего ответвления $N_{кр} = 9$.

Согласно методике [2], [3], для определения токов КЗ на низкой и высокой сторонах трансформатора, а также результирующих сопротивлений КЗ на шинах НН подстанции (реактансов на шинах НН) требуется выполнить вычисления по восьми формулам (значения реактансов на шинах НН необходимо знать для последующих расчетов токов КЗ на отходящих фидерах).

В настоящей работе автором выведены обобщенные выражения для определения результирующих реактансов на шинах НН подстанции:

$$x_{НН.мин} = \frac{U_{НН.ном}^2}{U_{с.ном}} \left[\frac{x_{с.макс}}{U_{T.мин}} + \frac{U_{T.мин} \cdot u_{k.N_+}}{100 \cdot S_{T.ном}} \right], \quad (4)$$

$$x_{НН.макс} = U_{НН.ном}^2 \left[\frac{x_{с.мин}}{U_{T.макс}^2} + \frac{u_{k.N_-}}{100 \cdot S_{T.ном}} \right], \quad (5)$$

где $x_{с.макс}$, $x_{с.мин}$ – сопротивления питающей системы соответственно в максимальном и минимальном режимах, Ом, причем $x_{с.макс} < x_{с.мин}$; $U_{с.ном}$ – номинальное напряжение системы, равное 110 кВ; $S_{T.ном}$ – номинальная мощность трансформатора, МВ·А.

Остальные обозначения приведены выше.

Данные выражения справедливы для любого типа трансформатора, в том числе и трехобмоточного, для которого при определении реактанса на стороне среднего напряжения предварительно определяют эквивалентное напряжение короткого замыкания между обмотками ВН, НН, СН по известным выражениям [2]. Если применя-

ется трансформатор с РПН $\Delta U = \pm 10\%$, то вместо $U_{T.\text{мин(макс)}}$ подставляются напряжения $U_{T.\text{мин}} = 103$ кВ и $U_{T.\text{макс}} = 126$ кВ, а значения напряжений $u_{к.\text{мин}}$ и $u_{к.\text{макс}}$ принимаются из паспортных данных на трансформатор при крайних положениях переключателя РПН.

Значения токов трехфазного КЗ на шинах НН определяются по формулам:

$$I_{\text{НН.макс}}^{(3)} = U_{\text{НН.ном}} / (\sqrt{3} \cdot x_{\text{НН.мин}}); \quad I_{\text{НН.мин}}^{(3)} = U_{\text{НН.ном}} / (\sqrt{3} \cdot x_{\text{НН.макс}}). \quad (6)$$

Данные токи КЗ приводятся к стороне ВН при соответствующих значениях коэффициента трансформации по следующим выражениям [3]:

$$I_{\text{ВН.макс}}^{(3)} = I_{\text{НН.макс}}^{(3)} / K_{T.\text{мин}}; \quad I_{\text{ВН.мин}}^{(3)} = I_{\text{НН.мин}}^{(3)} / K_{T.\text{макс}}. \quad (7)$$

Пример

Вычислить токи КЗ за трансформатором типа ТДН-16000/115/11 при следующих известных паспортных данных [4]:

$$\Delta U = \pm 16\%; \quad u_{к.\text{мин}} = 9,8\%; \quad u_{к.\text{ср}} = 10,5\%; \quad u_{к.\text{макс}} = 11,71\%.$$

Сопротивления питающей системы известны (данные энергосистемы):

$$x_{с.\text{макс}} = 17 \text{ Ом}; \quad x_{с.\text{мин}} = 32 \text{ Ом}.$$

Решение:

1) по (3) определяют напряжения короткого замыкания трансформатора на ранее вычисленных ответвлениях регулятора РПН $N_+ = 5$ и $N_- = 6$:

$$u_{к.N_+} = 10,5 - \frac{5}{9}(10,5 - 9,8) = 10,1\%;$$

$$u_{к.N_-} = 10,5 + \frac{6}{9}(11,71 - 10,5) = 11,3\%;$$

2) по выражениям (4), (5) определяют реактансы на шинах 11 кВ:

$$x_{\text{НН.мин}} = \frac{11^2}{110} \left[\frac{17}{102,7} + \frac{102,7 \cdot 10,1}{100 \cdot 16} \right] = 0,9 \text{ Ом};$$

$$x_{\text{НН.макс}} = 11^2 \left[\frac{32}{125,2^2} + \frac{11,3}{100 \cdot 16} \right] = 1,1 \text{ Ом};$$

3) определяют по (6) значения токов трехфазного КЗ на шинах 11 кВ:

$$I_{\text{НН.макс}}^{(3)} = 11000 / (\sqrt{3} \cdot 0,9) = 7057 \text{ А};$$

$$I_{\text{НН.мин}}^{(3)} = 11000 / (\sqrt{3} \cdot 1,1) = 5774 \text{ А}.$$

4) приводят данные токи КЗ к стороне ВН трансформатора с учетом изменения коэффициента трансформации по (7):

$$I_{\text{ВН.макс}}^{(3)} = 7057 / 9,34 = 755,9 \text{ А}; \quad I_{\text{ВН.мин}}^{(3)} = 5774 / 11,38 = 507,3 \text{ А}.$$

Если этот же пример решить по известной методике [3, с. 146], то в результате получим следующие значения:

$$I_{\text{НН.макс}}^{(3)} = 7520,8 \text{ А}; I_{\text{НН.мин}}^{(3)} = 5623 \text{ А}; I_{\text{ВН.макс}}^{(3)} = 856,4 \text{ А}; I_{\text{ВН.мин}}^{(3)} = 490,9 \text{ А};$$

$$K_{T.\text{мин}} = 96,6/11 = 8,78; K_{T.\text{макс}} = 126/11 = 11,45.$$

Погрешность расчета по методике [3] за счет принятых допущений составляет:

$$\Delta I_{\text{НН.макс}}^{(3)} = 6,6 \%; \Delta I_{\text{ВН.мин}}^{(3)} = 3,2 \%; \Delta K_{T.\text{мин}} = 5,9 \%.$$

Максимальный ток КЗ на шинах НН, завышенный на 6,6 %, приводит к необоснованному загрублению уставок токовых отсечек линий отходящих фидеров, а также увеличивает расчетный ток небаланса дифференциальной защиты трансформатора. Кроме того по максимальному току КЗ выбираются коммутационные аппараты и трансформаторы тока на подстанции. Приведенный к стороне ВН минимальный ток КЗ, заниженный на 3,2 %, казалось бы незначительно снизит чувствительность защит. Однако с учетом погрешности на 5,9 % коэффициента трансформации снижение расчетного коэффициента чувствительности составит более 9 %.

Покажем это на примере выбора тока срабатывания максимальной токовой защиты (МТЗ) данного трансформатора.

Предположим, что ток срабатывания МТЗ ввода 11 кВ, выбранный по условию несрабатывания защиты при сверхтоках после аварийных перегрузок и пусковых токов электродвигателей, составил 2200 А (примерно 260 % номинального тока трансформатора стороны НН). После приведения этого тока к стороне ВН при минимальном коэффициенте трансформации его значение составит [3]: $I_{\text{с.з.ВВ}} = 2200/9,34 = 236 \text{ А}$. Ток срабатывания МТЗ трансформатора на стороне ВН выбирается по условию согласования по чувствительности с защитой ввода:

$$I_{\text{с.з.Тр}} \geq 1,2 \cdot I_{\text{с.з.ВВ}} = 1,2 \cdot 236 = 282 \text{ А}.$$

Чувствительность защиты трансформатора проверяется при минимальном двухфазном токе КЗ на шинах НН, приведенном к стороне ВН:

$$K_{\text{ч}} = I_{\text{ВН.мин}}^{(2)} / I_{\text{с.з.Тр}} = 0,866 \cdot 507,3 / 282 = 1,56 > 1,5.$$

Если подобные расчеты выполнить для токов КЗ, полученных по известной методике, то значения уставок защит будут следующие:

$$I_{\text{с.з.ВВ}} = 2200/8,78 = 251 \text{ А}; I_{\text{с.з.Тр}} = 1,2 \cdot 251 = 301 \text{ А};$$

$$K_{\text{ч}} = 0,866 \cdot 490,9 / 301 = 1,41 < 1,5.$$

Коэффициент чувствительности защиты, согласно Правилам [1], должен быть не менее 1,5. Для второго варианта расчета чувствительность защиты трансформатора оказалась недостаточной.

В таких случаях применяют МТЗ с пуском по минимальному напряжению, причем пусковой орган минимального напряжения устанавливается со стороны НН [3]. Однако по мере возможности необходимо отказываться от применения защиты с пуском по напряжению. Это связано с тем, что с одной стороны, уменьшается вероятность отказа защиты трансформатора из-за потери оперативного тока при выгорании ячеек со стороны НН, что неоднократно наблюдалось в эксплуатации [5]. С дру-

гой стороны, улучшаются условия эксплуатации релейных защит на подстанциях промышленных предприятий, поскольку в силу балансной принадлежности цепи защиты со стороны ВН и НН зачастую обслуживаются персоналом разных организаций.

Заключение

Предлагаемый метод расчета токов короткого замыкания за трансформатором с регулятором напряжения $\Delta U_{\text{РПН}} = \pm 16\%$ сужает диапазон изменения значений максимального и минимального токов КЗ за счет более точного определения напряжения короткого замыкания трансформатора на промежуточных ответвлениях регулятора РПН, соответствующих реальному диапазону изменения рабочего напряжения в сетях 110 кВ, что в конечном итоге позволяет увеличить чувствительность релейной защиты трансформатора примерно на 10 %.

Литература

1. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд. – Москва : Энергоатомиздат, 1998.
2. Авербух, А. М. Релейная защита в задачах с решениями и примерами / А. М. Авербух. – Ленинград : Энергия, 1975.
3. Шабад, М. А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М. А. Шабад. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1985.
4. Руководящие указания по релейной защите. Р85. Вып. 13Б. Релейная защита понижающих трансформаторов 110–500 кВ: Расчеты. – Москва : Энергоатомиздат, 1985.
5. Беляев, А. В. Противоаварийное управление в узлах нагрузки с синхронными электродвигателями большой мощности / А. В. Беляев. – Москва : НТФ «Энергопресс», 2004.

Получено 24.02.2009 г.