

К ВОПРОСУ О ПРОЕКТИРОВАНИИ И НАЛАДКЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

КУТЯВИН И. Д.

Доцент, кандидат технических наук

Проектирование и наладочные испытания дифференциальной защиты трансформаторов в настоящее время сводятся лишь к выбору основного оборудования и к весьма приближенному определению основных параметров защиты¹⁾. При этом основную трудность составляет определение тока трогания, величина которого должна быть увязана с максимальным значением тока небаланса защиты.

В настоящей статье дается метод ориентировочного определения величины и способы уменьшения тока небаланса дифференциальной защиты трансформаторов.

Вывод основных выражений для тока небаланса

На рис. 1 приведена для одной фазы принципиальная схема дифференциальной защиты трансформатора с соединением обмоток Y/Y-12, выполненная при помощи реле типа ЭТ. Принятое направление токов в схеме указано стрелками, при этом для токов приняты следующие обозначения:

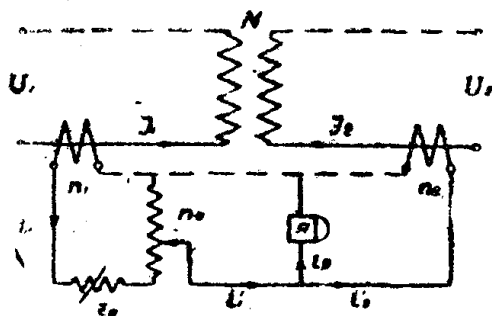


Рис. 1

I_1 и I_2 — первичный и вторичный токи силового трансформатора, имеющего коэффициент трансформации N , равный отношению линейных напряжений холостого хода;

I_0 — ток холостого хода силового трансформатора;

i_1 и i_2 — вторичные токи трансформаторов тока защиты, имеющих коэффициенты трансформации n_1 и n_2 ;

i_{01} и i_{02} — токи холостого хода трансформаторов тока;

i'_1 и i'_{01} — вторичный ток и ток холостого хода автотрансформатора с коэффициентом трансформации n_a .

Во всех выводах обозначения комплексной формы опущены. Ток в реле на основании рис. 1, $i_p = i'_1 - i_2$. (1)

Вторичный ток первого трансформатора тока связан с первичным (при прямой полярности) следующим соотношением:

$$i_1 = \frac{I_1}{n_1} - i_{01}.$$

¹⁾ Руководящие указания по релейной защите. Электрические станции, 1940, № 5—6.

Вторичный ток автотрансформатора

$$i_1' = \frac{i_1}{n_a} - i'_{01} = \frac{I_1}{n_1 n_a} - \frac{i_{01}}{n_a} - i'_{01}. \quad (2)$$

Вторичный ток силового трансформатора

$$I_2 = \frac{I_2'}{N},$$

где I_2' — вторичный ток силового трансформатора, приведенный к первичной стороне.

Вторичный ток трансформатора тока, установленного на стороне высшего напряжения силового трансформатора,

$$i_2 = \frac{I_2}{n_2} - i_{02} = \frac{I_2'}{N n_2} - i_{02}. \quad (3)$$

На основании (1), (2) и (3) ток в реле

$$\begin{aligned} i_p &= \left(\frac{I_1}{n_1 n_a} - \frac{i_{01}}{n_a} - i'_{01} \right) - \left(\frac{I_2'}{N n_2} - i_{02} \right) = \\ &= \left(\frac{I_1}{n_1 n_a} - \frac{I_2'}{N n_2} \right) + \left(i_{02} - i'_{01} - \frac{i_{01}}{n_a} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Коэффициент трансформации автотрансформатора должен быть выбран такой величины, при которой знаменатели первого члена правой части выражения (4) будут равны, т. е.

$$n_a = N \frac{n_2}{n_1}. \quad (5)$$

При соединении обмоток силового трансформатора в группу Y/Y-12 а обмоток трансформаторов тока в треугольник (второй случай), ток в реле

$$\begin{aligned} i_p &= \left[\left(\frac{I_1}{n_1 n_a} - \frac{i_{01}}{n_a} \right) \sqrt{3} - i'_{01} \right] - \left(\frac{I_2'}{N n_2} - i_{02} \right) \sqrt{3} = \\ &= \left(\frac{I_1}{n_1 n_a} - \frac{I_2'}{N n_2} \right) \sqrt{3} + \left(i_{02} \sqrt{3} - i'_{01} - \frac{i_{01} \sqrt{3}}{n_a} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Коэффициент трансформации автотрансформатора определяется по выражению (5).

При соединении обмоток силового трансформатора в группу Δ/Y-11, обмоток трансформаторов тока на стороне треугольника — в звезду, а на стороне звезды — в треугольник (третий случай), ток в реле

$$\begin{aligned} i_p &= \left(\frac{I_1}{n_1 n_a} - \frac{i_{01}}{n_a} - i'_{01} \right) - \left(\frac{I_2'}{N n_2} - i_{02} \right) \sqrt{3} = \\ &= \left(\frac{I_1}{n_1 n_a} - \frac{I_2' \sqrt{3}}{N n_2} \right) + \left(\sqrt{3} i_{02} - i'_{01} - \frac{i'_{01}}{n_a} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Коэффициент трансформации автотрансформатора для этого случая

$$n_a = \frac{N n_2}{\sqrt{3} n_1}. \quad (8)$$

При нормальном режиме работы силового трансформатора или при коротком замыкании вне зоны защиты разность между первичным током

I_1 и вторичным приведенным I_2' представляет собою ток холостого хода силового трансформатора I_0 . Учитывая это, а также на основании (4) и (5) для первого случая

$$i_p = i_{нб} = \left(\frac{I_0}{n_1 n_a} + i_{02} \right) - \left(\frac{i_{01}}{n_a} + i'_{01} \right), \quad (9)$$

где $i_{нб}$ — ток небаланса, протекающий через реле при указанных выше условиях.

На основании (6) и (5) для второго случая

$$i_p = i_{нб} = \left(\frac{I_{01} \sqrt{3}}{n_1 n_a} + i_{02} \sqrt{3} \right) - \left(\frac{i_{01} \sqrt{3}}{n_a} + i'_{01} \right). \quad (10)$$

На основании (7) и (8) для третьего случая

$$i_p = i_{нб} = \left(\frac{I_{01}}{n_1 n_a} + i_{02} \sqrt{3} \right) - \left(\frac{i_{01}}{n_a} + i'_1 \right). \quad (11)$$

При обратном питании силового трансформатора ток небаланса для первого случая

$$i_{нб} = \left(\frac{I_{02}}{n_2} + \frac{i_{01}}{n_a} + i'_{01} \right) - i_{02}; \quad (12)$$

для второго случая

$$i_{нб} = \left(\frac{I_{02} \sqrt{3}}{n_2} + \frac{i_{01} \sqrt{3}}{n_a} + i'_{01} \right) - i_{02} \sqrt{3}; \quad (13)$$

для третьего случая

$$I_{нб} = \left(\frac{I_{02} \sqrt{3}}{n_2} + \frac{i_{01}}{n_a} + i'_{01} \right) - i_{02} \sqrt{3}. \quad (14)$$

При выводе выражений (9) — (14) предполагается, что автотрансформатор включен в цепь защиты согласно рис. 1.

Из выражений (9) — (14) вытекает, что ток небаланса дифференциальной защиты трансформаторов зависит от величины и фазы токов холостого хода трансформаторов тока, автотрансформатора и силового трансформатора. А токи холостого хода зависят, в свою очередь, от качества железа этих аппаратов и от их нагрузки.

Определение токов холостого хода

Как известно, зависимость удельных намагничивающих ампервитков для трансформаторов тока и автотрансформаторов от максимальной индукции (в пределах 0 — 7000 гаусс) может быть выражена с достаточной точностью уравнением (по данным завода „Электроаппарат“) $aw_{уд} = cB_m^\alpha$ (15), где $c = 0,0023 + 0,0045$ (в зависимости от сорта железа), $\alpha = 0,6 + 0,7$.

Величина полного намагничивающего тока на основании (15)

$$i_n = \frac{C \cdot l_{ср}}{w} B_m^\alpha, \quad (16)$$

где $l_{ср}$ — длина средней силовой линии в см;

w — вторичное число витков трансформатора тока или автотрансформатора.

Величина максимальной индукции для трансформатора

$$B_m = \frac{e \cdot 10^8}{4,44 f q W} \quad (17)$$

Активной составляющей тока холостого хода можно пренебречь, тогда на основании (16) и (17)

$$i_0 = \frac{e^\alpha}{\frac{(4,44fq)^\alpha \cdot W^{(1+\alpha)}}{10^{8\alpha} \cdot C \cdot I_{cp}}} = \frac{e^\alpha}{A}, \quad (18)$$

где постоянная ¹⁾

$$A = \frac{(4,44fq)^\alpha \cdot W^{(1+\alpha)}}{10^{8\alpha} \cdot C \cdot I_{cp}}. \quad (19)$$

Постоянная А для трансформаторов тока может быть взята из раздела С — 1 „Руководящих указаний по релейной защите“, том II.

Величина вторичной э.д.с. трансформатора тока (или автотрансформатора)

$$e = iZ, \quad (20)$$

где i — ток во вторичной обмотке трансформатора тока (или автотрансформатора).

Сопротивление вторичной цепи трансформаторов тока, соединенных звездой, при наличии в цепи автотрансформатора

$$Z_y = Z_r + Z_{np} + \frac{1}{n_a^2} (Z_{ат} + Z'_{np}). \quad (21)$$

То же, но соединенных в треугольник,

$$Z_\Delta = Z_r + 3 \left[Z_{np} + \frac{1}{n_a^2} (Z_{ат} + Z'_{np}) \right]. \quad (22)$$

Сопротивление вторичной цепи трансформаторов тока при отсутствии автотрансформатора вычисляется по выражению (21) или (22) при

$$Z_{ат} = 0 \text{ и } Z'_{np} = 0.$$

Сопротивление вторичной цепи автотрансформатора

$$Z_a = \frac{Z_{ат}}{2} + Z'_{np}, \quad (23)$$

где Z — сопротивление вторичной обмотки трансформатора тока;
 Z_{np} — сопротивление проводов до автотрансформатора (или до точки отпайки на реле);

$Z_{ат}$ — сопротивление автотрансформатора, приведенное к его вторичной стороне);

Z'_{np} — сопротивление проводов от автотрансформатора до реле.

При применении реле с тормозным действием в выражения (21), (22) и (23) должно быть включено еще сопротивление тормозной катушки.

На рис. 2 и 3 приведена зависимость $i_0 = f(e, A)$ по выражению (18) при $\alpha = 2/3 = 0,667$. Кривые построены для удобства пользования в двух масштабах. По оси абсцисс отложена э.д.с. в вольтах, а по оси ординат — ток холостого хода в миллиамперах. Кривые помечены различным значением А.

Ток холостого хода силовых трансформаторов для нормального режима может быть взят из каталога. При коротком замыкании за трансформатором величина э.д.с. трансформатора в зависимости от мощности источника питания находится в пределах $(25 \div 50) \%$ U_n . В соответствии с этим

¹⁾ См. Соловьев Л. Е. и Федосеев Д. М. „Релейная защита“ ч. 1. 1938.

и ток холостого хода для данного режима может быть взят в пределах $(25 \pm 50)\% I_{0н}$.

Однако наладка дифференциальной защиты трансформаторов и измерение тока небаланса обычно производится при нормальном коротком за-

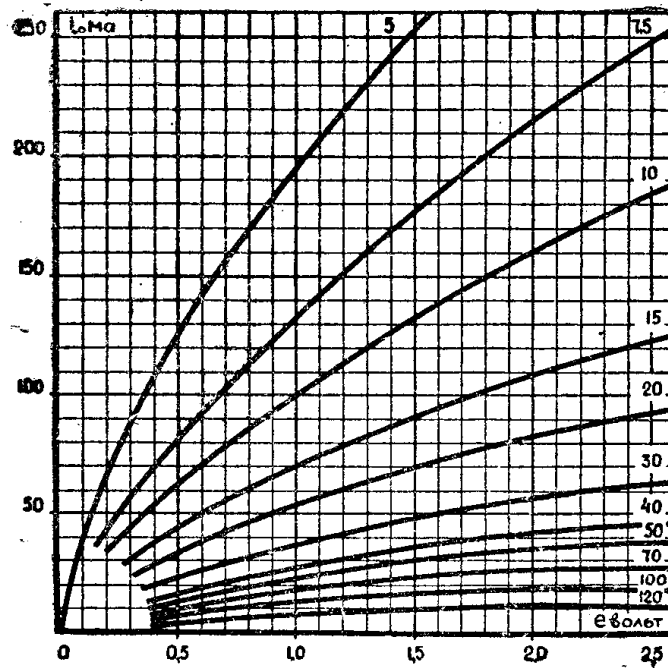


Рис. 2

мыкании трансформатора, в этом случае расчетный ток холостого хода трансформатора может быть грубо определен из следующего выражения:

$$I_{0р} = \frac{e_k\%}{100} I_{0н}, \quad (24)$$

где $e_k\%$ — напряжение короткого замыкания трансформатора,

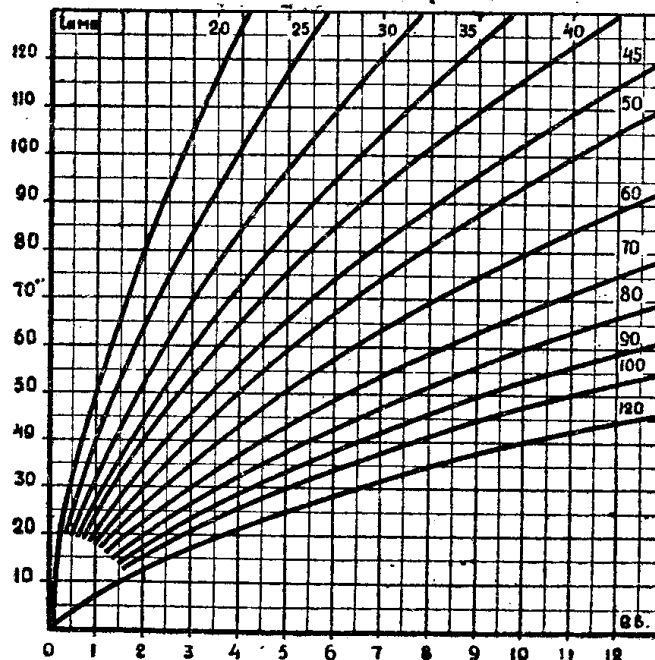


Рис. 3

$I_{0н}$ — ток холостого хода при номинальном напряжении и при нормальном режиме.

Способы уменьшения тока небаланса

На основании (9), (18) и (24) выражение тока небаланса для первого случая

$$i_{нб} \cong \left(\frac{I_{01}}{n_1 n_a} + \frac{e_2^\alpha}{A_2} \right) - \left(\frac{e_1^\alpha}{A_1 n_a} + \frac{e_a^\alpha}{A_a} \right), \quad (25)$$

где e_1 , e_2 и e_a — э.д.с. трансформаторов тока и автотрансформатора;

A_1 , A_2 и A_a — их постоянные.

Все величины, входящие в выражение (25), подставляются в соответствии с тем режимом, при котором производится наладка защиты.

Условие наибольшей чувствительности защиты требует, чтобы ток небаланса по выражению (25) был равен нулю, тогда

$$\left(\frac{I_{01}}{n_1 n_a} + \frac{e_2^\alpha}{A_2} \right) - \left(\frac{e_1^\alpha}{A_1 n_a} + \frac{e_a^\alpha}{A_a} \right) = 0. \quad (26)$$

Значения э.д.с., входящих в уравнение (26), на основании (5) и (20)

$$e_1 = \frac{I_1}{n_1} Z_1;$$

$$e_a = \frac{I_1}{n_1 n_a} Z_a;$$

$$e_2 = \frac{I'_2}{N n_2} Z_2 \cong \frac{I_1}{n_1 n_a} Z_2.$$

Если пренебречь током холостого хода силового трансформатора I_{01} и подставить значения э.д.с., то уравнение (26) примет следующий вид:

$$\frac{I_1^\alpha Z_{a2}}{(n_1 n_a)^\alpha A_2} - \left[\frac{I_1^\alpha Z_1^\alpha}{n_1^\alpha n_a A_1} + \frac{I_1^\alpha Z_a^\alpha}{(n_1 n_a)^\alpha A_a} \right] = 0,$$

$$\frac{Z_2^\alpha}{A_2} - \left(\frac{Z_1^\alpha}{A_1 n_a^{(1-\alpha)}} + \frac{Z_a^\alpha}{A_a} \right) = 0, \quad (27)$$

где Z_1 , Z_2 и Z_a — полные сопротивления вторичных цепей трансформаторов тока и автотрансформатора.

Уравнения (26) и (27) выражают условие равновесия плеч дифференциальной защиты трансформатора, при этом уравнение (27) указывает, что ток небаланса защиты будет иметь наименьшую величину при вполне определенном соотношении вторичных сопротивлений Z и постоянных A трансформаторов тока и автотрансформаторов.

В случае, если параметры выбранного оборудования защиты не удовлетворяют условию равновесия (26) и (27), то можно применять следующие мероприятия¹⁾:

1. Включить автотрансформаторы в цепь недогруженных трансформаторов тока (с большей постоянной A).

¹⁾ Руководящие указания по релейной защите. Раздел Т-3, „Электрические станции“. 1940, № 5—6.

2. Увеличить сечение соединительных проводов перегруженных трансформаторов тока (с малой постоянной А).

3. Увеличить коэффициент трансформации перегруженных трансформаторов тока с учетом пределов коэффициентов трансформации автотрансформаторов.

4. Применить более мощные трансформаторы тока вместо перегруженных.

5. Включить последовательно два трансформатора тока (при использовании втулочных), при этом ток холостого хода

$$i_0 = \frac{\left(\frac{e}{2}\right)^\alpha}{A}, \quad (28)$$

а величина вторичного сопротивления

$$Z_\Delta = 2Z_T + 3Z_{np} + \dots \quad (29)$$

В этом случае, если указанные выше мероприятия не позволяют удовлетворить уравнения (26) и (27), можно включить в цепь недогруженных трансформаторов тока (в рассечку соединительных проводов) добавочное регулируемое сопротивление Z_d . Если, например, в схеме рис. 1 недогружен первый трансформатор тока, то добавочное сопротивление, которое должно быть включено в его цепь на основании (21) и (26),

$$Z_A = \frac{n_1}{I_1} \left[\left(\frac{I_{01}}{n_1 n_A} + \frac{e_2^\alpha}{A_2} - \frac{e_A^\alpha}{A_A} \right) A_1 n_A \right]^{\frac{1}{\alpha}} - Z_T - Z_{np} - \dots \quad (30)$$

Вместо включения в рассечку соединительных проводов добавочного сопротивления Z_d , когда это сопротивление получается большим, можно шунтировать вторичную цепь недогруженного трансформатора тока регулируемым сопротивлением. При включении трансформаторов тока и шунтирующих сопротивлений в звезду

$$Z_{ш\Delta} = \frac{e - iZ}{i_{нб} n_A}, \quad (31)$$

где числитель — напряжение в точке подключения шунтирующего сопротивления;

$i_{нб}$ — ток небаланса, определенный по выражению (9), (10) или (12), (13) в зависимости от направления питания;

$Z_{ш\Delta}$ — шунтирующее сопротивление.

При включении трансформаторов тока и шунтирующих сопротивлений в треугольник

$$Z_{ш\Delta} = \frac{(e - iZ) \sqrt{3}}{n_A i_{нб}}, \quad (32)$$

где $i_{нб}$ — ток небаланса, определяемый по выражению (11) или (14).

Шунтирующее сопротивление необходимо изготавливать в виде катушки с железом с таким же насыщением, что и трансформаторы тока, тогда это сопротивление будет иметь характеристику тока в соответствии с выражением (18).

Соотношение между активной составляющей тока холостого хода и реактивной трансформаторов тока одной и той же фазы может быть различным, поэтому может иногда потребоваться дополнительное уравновешивание активных составляющих путем шунтирования недогруженного трансформатора тока активным регулируемым сопротивлением.

Заключение

Приведенный выше анализ дифференциальной защиты силовых трансформаторов показывает, что чувствительность и селективность ее зависят главным образом от правильного выбора и расстановки основного оборудования схемы.

Из уравнений (26) и (27) вытекает, что для осуществления защиты необходимо применять трансформаторы тока с постоянными A , находящимися в определенном соотношении. В частности при $Z_1 = Z_2 = Z_a$ и при $n_a = 1$ на основании (27)

$$A_2 = \frac{A_1 A_a}{A_1 + A_a}. \quad (33)$$

Перед заводом „Электроаппарат“ необходимо поставить вопрос о комплектной поставке трансформаторов тока и автотрансформаторов для дифференциальной защиты трансформаторов с учетом постоянных A .

Из выражений (9) — (14) вытекает также, что автотрансформаторы необходимо включать в схему защиты, при применении трансформаторов тока с одинаковой постоянной A , со стороны питания, а во всех других случаях — в цепь трансформаторов тока с большей A .

Выражения (9) — (14) могут быть использованы для ориентировочного определения тока небаланса в том случае, если не применяется искусственное уравнивание при помощи Z_d или $Z_{ш}$. При применении Z_d или $Z_{ш}$ ток небаланса может быть определен только при наладке защиты. По известной величине тока небаланса при номинальном режиме можно ориентировочно определить максимальное значение его при сквозном токе короткого замыкания по следующему выражению:

$$I_{нбм} = I_{нбн} \left(\frac{k I_{кз}}{I_{нт}} \right)^a, \quad (34)$$

где k — ударный коэффициент, учитывающий постоянную составляющую тока короткого замыкания;

$I_{кз}$ — периодическая составляющая тока короткого замыкания в начальный момент времени при максимальном режиме в системе,

$I_{нт}$ — номинальный ток силового трансформатора.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
89	Рис. 3	(Рисунок перевернут)	
92	7 снизу	i_{02}	$-i_{02}$
95	19 снизу	Z	Z_T
97			В уравнении (27) α является показателем степени
98	19 снизу	$Z_m \Delta$	$Z_m V$
101	15 снизу	окружающей	окружностей
178	17 снизу	$s = \frac{n}{n}$	$s = \frac{n}{n_0}$
193	4 сверху	$I_2^2 = \frac{E}{1 + Z^2}$	$I_2^2 = \frac{\varepsilon}{1 + Z^2}$
203	12 сверху	$I = I_m \left(1 - e^{-\frac{\Gamma_m}{L_m} t} \right) = \dots$	$I = I_m \left(1 - e^{-\frac{\Gamma_m}{L_m} t} \right) = \dots$
203	17 снизу	закрывающихся	закрывающийся
214	8 снизу	(28)	(26)
221	4 сверху	$\dots \frac{i_0^2 - i''_a}{i_{01} - i''_a}$	$\dots \frac{i_{02} - i''_a}{i_{01} - i''_a}$
318	Подпись к рис. 5	Потери тепла неполноты горения.	Потери тепла от неполноты горения.
318	14 снизу	(рис. 3)	(рис. 4)
323	1 сверху	аттуру	пературу
323	1 сверху	$r = 58$	$r = 587$
325	На рис. 6	$q'_{\text{вод}}$ и $q''_{\text{вод}}$	$q'_{\text{вод}}$ и $q''_{\text{вод}}$
326	33 сверху	$/2 \cdot 3 + 25 = 293 \text{ K},$	$/273 + 25 = 293 \text{ K},$