

К ВОПРОСУ ОБ УРАВНОВЕШИВАНИИ ПЛЕЧ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В. С. КОЛЕСНИКОВ, И. Д. КУТЯВИН

В последние годы в Советском Союзе проведена большая исследовательская работа по усовершенствованию дифференциальной защиты силовых трансформаторов. Seriously повысило селективность защиты внедрение в практику насыщающихся вспомогательных трансформаторов и автотрансформаторов (БНТ, ВТН). Еще более эффективным представляется применение трансформаторных реле с торможением и с насыщающимися элементами (РНТ, МЗТ, ДЗТ), которые были предложены в последнее время А. Д. Дроздовым.

Заслуживает внимания то обстоятельство, что почти все исследования, касающиеся дифференциальной защиты трансформаторов, совершенно не затрагивают вопроса уравнивания плеч защиты. В то время давно является очевидным, что соотношение параметров плеч дифференциальной защиты трансформаторов оказывает существенное влияние на величину тока небаланса, а следовательно, на селективность ее работы.

В настоящее время на кафедре электрических станций, сетей и систем Томского политехнического института проводятся теоретические и экспериментальные исследования эффективности уравнивания плеч дифференциальной защиты трансформаторов. Работа разделена на ряд этапов. В настоящей статье приводятся результаты исследований установившегося режима.

Так как в настоящее время находят применение в эксплуатации не только новые виды дифференциальных защит трансформаторов, но и защиты без применения насыщающихся элементов, представляет интерес провести анализ схем как старых, так и новых типов защит

Вывод условия равновесия плеч дифференциальной защиты трансформатора при установившемся режиме

Рассмотрим принципиальную схему дифференциальной защиты силового трансформатора с соединением обмоток $Y/Y-12$ (фиг. 1).

I_1 и I_2 —первичный и вторичный токи силового трансформатора;

i_1 и i_2 —вторичные токи трансформаторов тока;

i_{01} и i_{02} —токи намагничивания трансформаторов тока;

i_a и i_{0a} —вторичный ток и ток намагничивания автотрансформатора;

N ; n_1 ; n_2 ; n_a —коэффициенты трансформации силового трансформатора,

трансформаторов тока и автотрансформатора, причем:

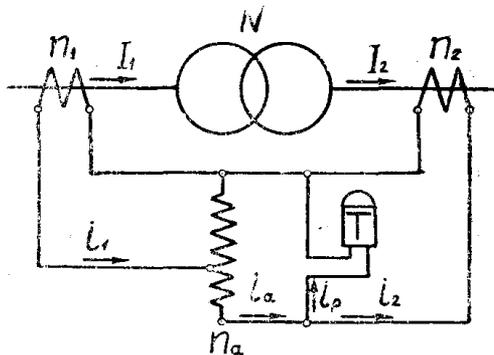
$$n_a = N \frac{n_2}{n_1}.$$

Величиной тока намагничивания силового трансформатора можно пренебречь, в связи с чем имеет место равенство

$$I_1 = N I_2.$$

Вторичная цепь дифференциальной защиты, изображенной на фиг. 1, может быть представлена в виде схемы замещения, показанной на фиг. 2.

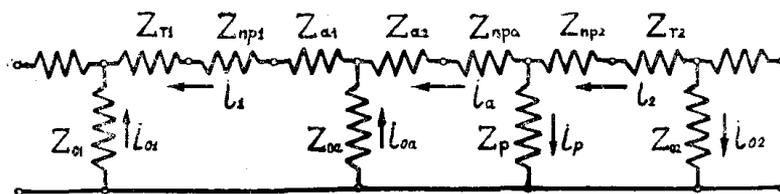
Так как автотрансформатор работает в режиме короткого замыкания, его можно рассматривать как обычный трансформатор с сопротивлениями первичной



Фиг. 1.

и вторичной обмоток, уменьшенными

в $\left(1 - \frac{1}{n_a}\right)$ раз [1].



Фиг. 2.

Z_{T1} и Z_{T2} — сопротивления вторичных обмоток трансформаторов тока;

Z_{np1} и Z_{np2} — сопротивление соединительных проводов от трансформатора тока до автотрансформатора либо до отпайки на реле;

Z_{a1} и Z_{a2} — сопротивления обмоток трансформатора, эквивалентного автотрансформатору;

Z_{npa} — сопротивление соединительных проводов от отпайки на реле до автотрансформатора;

Z_{o1} и Z_{o2} — сопротивления ветвей намагничивания трансформаторов тока;

Z_{oa} — сопротивление ветви намагничивания автотрансформатора.

Обозначим:

$$Z_{T1} + Z_{np1} + Z_{a1} = Z_1, \quad (1)$$

$$Z_{T2} + Z_{np2} = Z_2, \quad (2)$$

$$Z_{a2} + Z_{npa} = Z_3. \quad (3)$$

Ввиду того, что при установившемся режиме $z_{0a} \gg z_3$, принимаем $z_{0a} = \infty$. Учитывая это допущение, составим уравнение по второму закону Кирхгофа для контура вторичной цепи первого трансформатора тока:

$$E_{T1} = i_{01} \cdot z_{01} = i_1 \cdot z_1 + i_a \cdot z_3 \frac{1}{n_a}, \quad (4)$$

$$\text{но} \quad i_1 = (i_a + i_{0a}) \cdot n_a. \quad (5)$$

Подставив (5) в (4) получим:

$$i_{01} z_{01} n_a = (i_a + i_{0a}) z_1 n_a^2 + i_a z_3. \quad (6)$$

Решим последнее уравнение относительно i_a

$$i_a = \frac{n_a (i_{01} z_{01} - i_{0a} n_a z_1)}{n_a^2 z_1 + z_3}. \quad (7)$$

Рассмотрев аналогичным образом контур плеча второго трансформатора тока, найдем

$$i_2 = \frac{i_{02} z_{02}}{z_2}. \quad (8)$$

Ток в реле дифференциальной защиты (ток небаланса)

$$i_p = i_a - i_2. \quad (9)$$

Положив ток в реле равным нулю и используя выражения (7), (8) и (9), получим уравнение, выражающее условие равновесия плеч дифзащиты:

$$\frac{n_a (i_{01} z_{01} - i_{0a} n_a z_1)}{n_a^2 z_1 + z_3} = \frac{i_{02} z_{02}}{z_2}. \quad (10)$$

При применении автотрансформаторов высокого класса, например ВУ—25, величиной тока намагничивания автотрансформатора можно пренебречь. В этом случае: $i_{0a} \cdot n_a z_1 = 0$ и

$$\frac{i_{01}}{n_a} = i_{02}. \quad (11)$$

В результате равенство (10) упростится:

$$\frac{n_a^2 z_{01}}{n_a^2 z_1 + z_3} = \frac{z_{02}}{z_2}. \quad (12)$$

При отсутствии автотрансформатора $n_a = 1$; $z_3 = 0$, соответственно получим:

$$\frac{z_{01}}{z_1} = \frac{z_{02}}{z_2}. \quad (13)$$

При соединении обмоток силового трансформатора по схеме $\Delta/Y-11$, а обмоток трансформаторов тока на стороне треугольника в звезду и на стороне звезды в треугольник, сопротивление плеча защиты одной фазы со стороны трансформаторов тока, соединенных в Δ , будет равно:

$$z_2 = z_{T2} + 3z_{np2}. \quad (14)$$

В этом случае коэффициент трансформации автотрансформатора определится следующим выражением:

$$n_a = \frac{N n_2}{\sqrt{3} n_1},$$

а соотношение между токами намагничивания трансформаторов тока:

$$\frac{i_{01}}{n_a} = \frac{i_{02}}{\sqrt{3}}. \quad (15)$$

Методика расчета оптимального соотношения сопротивлений плеч дифференциальной защиты трансформаторов

Уравновешивание плеч дифференциальной защиты силовых трансформаторов может быть произведено за счет соответствующего подбора сечений соединительных проводов цепи циркуляции дифзащиты. Для этой цели необходимо иметь типовые характеристики холостого хода для отдельных трансформаторов тока $E(I_0)$.

Задавшись минимально допустимым сечением соединительных проводов в цепи более мощного трансформатора тока и определив полное сопротивление этого плеча, можно подсчитать значение э. д. с. вторичной обмотки трансформатора тока. Применительно к схеме фиг. 1 э. д. с. вторичной обмотки первого трансформатора тока определится по формуле

$$E_1 = \frac{I_{ном} k}{n_1} \left(z_1 + \frac{z_3}{n_a^2} \right), \quad (16)$$

где $I_{ном}$ —номинальный ток первичной обмотки силового трансформатора,

k —кратность тока внешнего короткого замыкания.

Величины z_1 и z_3 подсчитываются по формулам (1) и (3).

Определив по кривой $E(I_0)$ величину тока намагничивания (i_{01}) первого трансформатора тока, подсчитываем, используя равенство (11), значение тока намагничивания (i_{02}) трансформатора тока, установленного в противоположном плече.

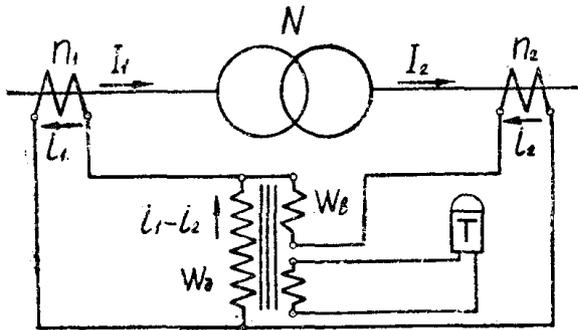
По кривой $E(I_0)$ находим величину э. д. с. второго трансформатора тока E_2 , соответствующую величине i_{02} и подсчитываем, используя уравнение (12), оптимальное значение сопротивления плеча второго трансформатора тока

$$z_2 = \frac{E_2}{E_1} \frac{n_a^2 z_1 + z_3}{n_a}. \quad (17)$$

При соединении обмоток силового трансформатора по схеме $\Delta/Y-11$ и включении трансформаторов тока со стороны треугольника в звезду (индекс 1), а со стороны звезды в треугольник (индекс 2) порядок расчета не изменится. Однако соотношение между токами намагничивания определится выражением (15). Сопротивление плеча второго трансформатора тока, как и в предыдущем случае, находится по выражению (17).

**Условие равновесия плеч дифференциальной защиты,
выполненной с применением ВТН с ЭТ-561**

Очевидно, что в случае, когда выравнивающая обмотка ВТН не используется (при $n_1 = N n_2$), условие минимума тока небаланса будет определяться выражением (13). Методика и последовательность расчета будет подобна вышеизложенной.



Фиг. 3.

Рассмотрим схему дифференциальной защиты силового трансформатора для случая соединения обмоток $Y/Y-12$ и с использованием как дифференциальной, так и выравнивающей обмоток ВТН (фиг. 3).

Обозначения аналогичны

принятым для фиг. 1, кроме того:

w_0 — число витков дифференциальной обмотки ВТН,

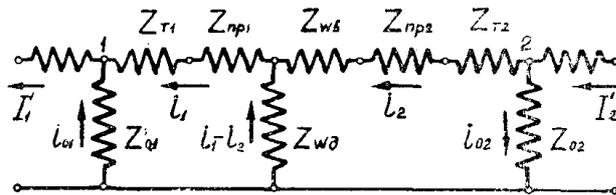
w_B — число витков выравнивающей обмотки ВТН, $i_1 > i_2$.

Как известно, число витков выравнивающей обмотки определяется, исходя из равенства:

$$w_0(i_1 - i_2) = i_2 w_B. \quad (18)$$

Причем полученное расчетом количество витков выравнивающей обмотки округляется до целого числа.

При внешнем коротком замыкании ток в реле ЭТ-561 будет равен нулю в том случае, когда равен нулю магнитный поток в сердечнике ВТН. С учетом вышесказанного, для случая равновесия плеч (при $I_{\text{нб}} = 0$) будет справедлива схема замещения вторичной цепи дифференциальной защиты, изображенная на фиг. 4.



Фиг. 4.

Обозначения соответствуют принятым для фиг. 2, с учетом формул (1) и (2), кроме того:

Z_{w0} — сопротивление дифференциальной обмотки ВТН;

Z_{wB} — сопротивление выравнивающей обмотки ВТН.

Величиной тока намагничивания силового трансформатора пренебрегаем.

Применяя к узлам 1 и 2 первый закон Кирхгофа, найдем:

$$i_1 = I_1 - i_{01} = \frac{I_1}{n_1} - i_{01}, \quad (19)$$

$$i_2 = I_2 - i_{02} = \frac{I_1}{N n_2} - i_{02}. \quad (20)$$

Подставив выражения (19) и (20) в равенство (18), после ряда несложных преобразований найдем соотношение между токами намагничивания трансформаторов тока, обуславливающее минимум тока небаланса в реле ЭТ-561.

$$i_{01} = i_{02} \frac{\omega_{\partial} + \omega_{\partial}}{\omega_{\partial}} + I_{ном} \cdot k \left[\frac{1}{n_1} - \frac{1}{N \cdot n_2} \cdot \frac{(\omega_{\partial} + \omega_{\partial})}{\omega_{\partial}} \right]; \quad (21)$$

$$i_{02} = i_{01} \frac{\omega_{\partial}}{\omega_{\partial} + \omega_{\partial}} + I_{ном} \cdot k \left[\frac{1}{N n_2} - \frac{1}{n_1} \frac{\omega_{\partial}}{(\omega_{\partial} + \omega_{\partial})} \right]. \quad (22)$$

Наличие падения напряжения на дифференциальной обмотке ВТН, которое возникает в связи с протеканием по ней тока ($i_1 - i_2$), необходимо учитывать при определении нагрузки на трансформаторы тока.

В частности, при $i_1 > i_2$ наличие падения напряжения на дифференциальной обмотке эквивалентно увеличению нагрузки на первый трансформатор тока на величину

$$\Delta z_1 = z_{\omega\partial} \left(1 - \frac{n_1}{N n_2} \right) \quad (23)$$

и уменьшению нагрузки на второй трансформатор тока на величину

$$\Delta z_2 = z_{\omega\partial} \left(\frac{N n_2}{n_1} - 1 \right). \quad (24)$$

Методика и последовательность расчета оптимального соотношения сопротивлений плеч будут полностью аналогичны ранее изложенной, однако расчетные формулы несколько видоизменятся. Так, э. д. с. вторичной обмотки первого трансформатора тока определится по формуле:

$$E_1 = \frac{I_{ном} k}{n_1} z_1, \quad (25)$$

причем

$$z_1 = z_{T1} + z_{np1} + \Delta z_1. \quad (26)$$

Величину тока намагничивания второго трансформатора тока следует определять по выражению (22). Полное сопротивление плеча второго трансформатора тока будет равно

$$z_2 = \frac{E_2}{E_1} \frac{N n_2}{n_1} z_1, \quad (27)$$

причем:

$$z_2 = z_{T2} + z_{np2} + z_{\omega\partial} - \Delta z_2. \quad (28)$$

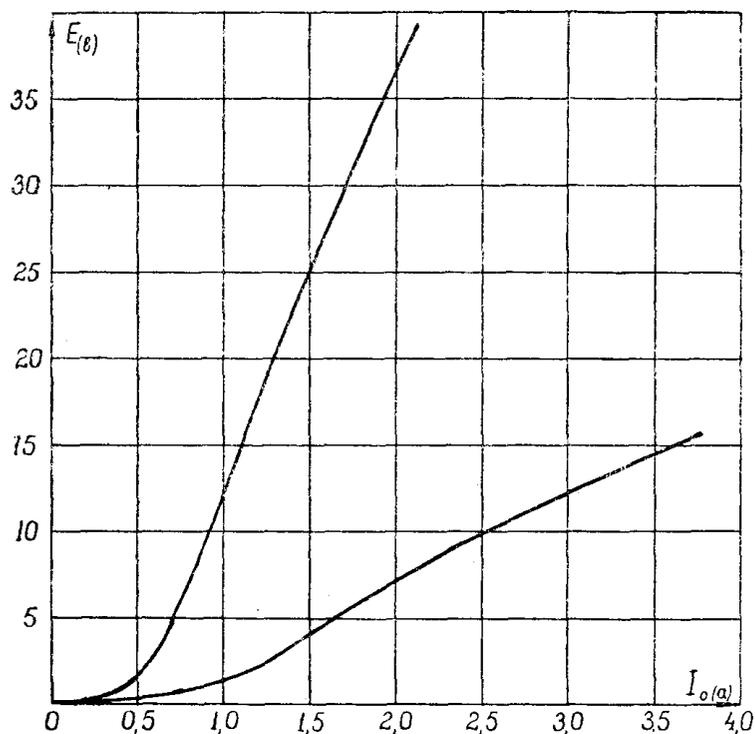
При соединении обмоток силового трансформатора по схеме $\Delta Y-11$ и при условии установки первого трансформатора тока со стороны треугольника величина тока намагничивания второго трансфор-

матора и сопротивление его плеча могут быть определены по следующим выражениям:

$$i_{02} = i_{01} \frac{\omega_{\partial}}{\omega_{\partial} + \omega_{\delta}} + I_{1н.о.м} \cdot k \left[\frac{\sqrt{3}}{Nn_2} - \frac{1}{n_1} \frac{\omega_{\partial}}{\omega_{\partial} + \omega_{\delta}} \right], \quad (30)$$

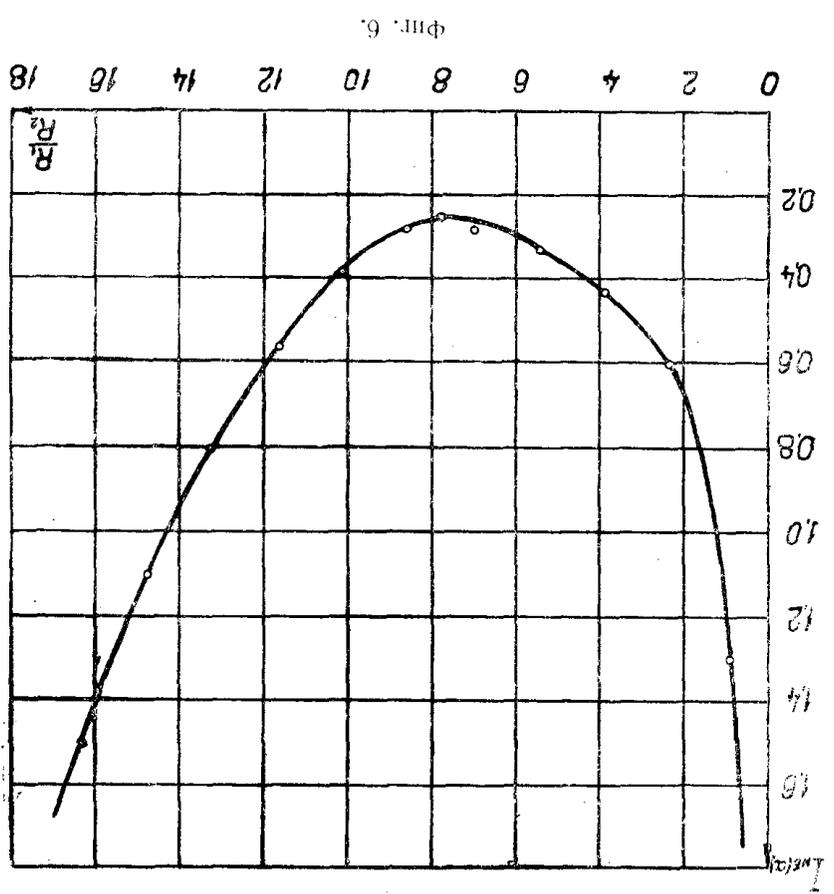
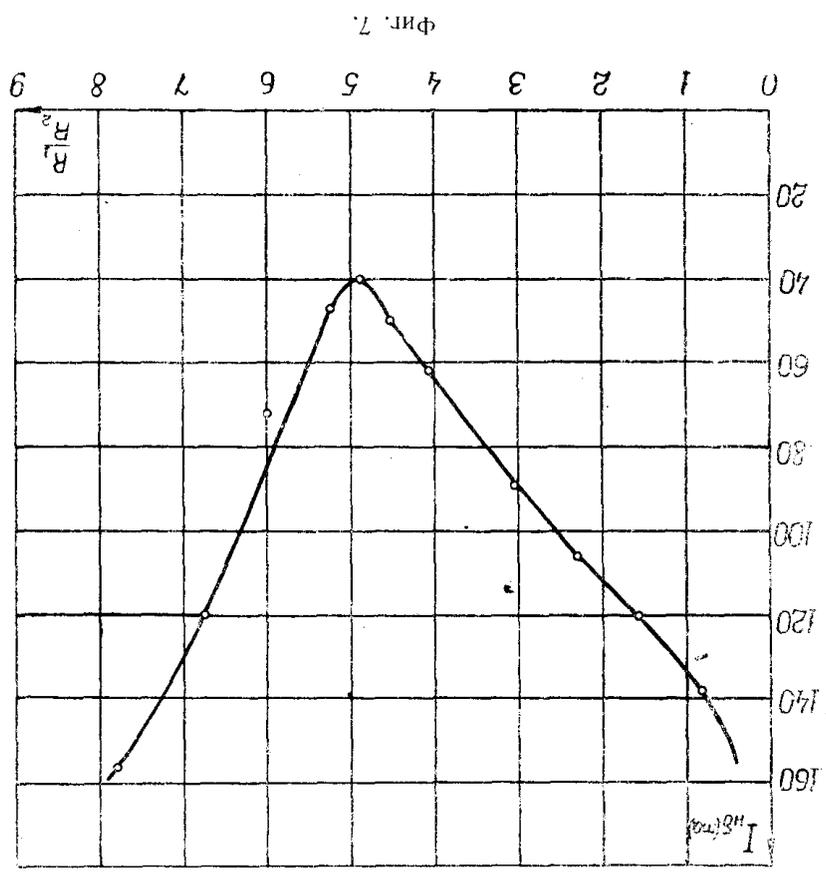
$$z_2 = \frac{E_2 N n_2}{E_1 \sqrt{3} n_1} \cdot z_1. \quad (31)$$

Экспериментальная проверка вышеизложенной методики расчета дала достаточно хорошие результаты. Для исследования были изготовлены трансформаторы из разных сортов стали (кривые зависимости $E(I_0)$ для одной из них представлены на фиг. 5) с различными числами витков вторичных обмоток, разными площадями сечений и длинами средних линий сердечников. Для выравнивания вторичных токов трансформаторов тока были использованы автотрансформатор ВУ - 25 и насыщающийся трансформатор ВТН-561.



Фиг. 5.

В плечи цепи циркуляции последовательно вводились добавочные сопротивления различных величин. Значение тока, проходящего по первичным обмоткам трансформаторов тока, было подобрано таким образом, чтобы создать в сердечниках этих трансформаторов индукции, соответствующие прохождению 6—8-кратного тока сквозного короткого замыкания в реальной схеме дифференциальной защиты силового трансформатора. На фиг. 6 представлена кривая зависимости величины установившегося тока небаланса от соотношения сопротивлений плеч для одной из пар трансформаторов тока. На фиг. 7 приводится кривая зависимости величины установившегося тока небаланса в обмотке реле ЭТ - 561 от соотношения сопротивлений плеч. Дифференциальная обмотка ВТН - 561 имела при этом 20 витков.



Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Уравновешивание плеч дифференциальной защиты путем подбора оптимального соотношения сопротивлений плеч приводит к существенному снижению величины тока небаланса при внешних коротких замыканиях.

2. При наличии кривых зависимости $E(I_0)$ для трансформаторов тока, применяющихся в дифференциальных защитах, расчет оптимальных соотношений сопротивлений плеч может быть проведен достаточно просто по предлагаемой методике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пиотровский Л. М. Электрические машины. ГЭИ, 1949.