

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ИХ И ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

И. Д. КУТЯВИН

В настоящее время для защиты генераторов от замыканий на землю начинает находить применение дифференциальная защита нулевой последовательности, изображенная на рис. 1 (схема 1). Как показано рядом исследователей (Г. И. Атабеков, А. М. Федосеев и др.), эта схема по своим качествам не уступает защите максимальной мощности нулевой последовательности с компенсацией тока небаланса.

Это обстоятельство указывает на возможность дальнейшего упрощения защиты генераторов путем использования продольной дифференциальной защиты, выполненной по схеме 2 или 3, рис. 1, и для защиты их от

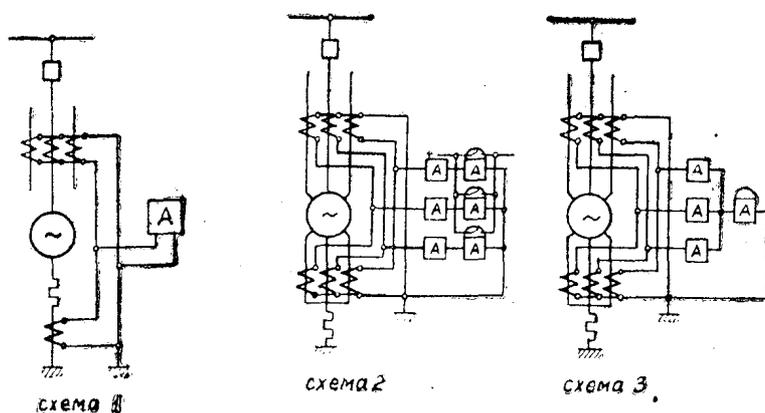


Рис. 1

замыканий на землю. Для получения указанных схем необходимо включить в цепь реле нормальной дифференциальной защиты, как это показано на рис. 1, по одному дополнительному реле в каждую фазу (схема 2) или только в нулевой провод (схема 3). Оперативная цепь этих реле блокируется защитой от сверхтоков. Интересно поэтому сравнить между собою указанные выше три схемы по их чувствительности и другим качествам.

Некоторые соображения о величине токов небаланса указанных схем

Рассматриваемые схемы не являются равноценными по величине тока небаланса. Схема 2, по нашему мнению, будет иметь наименьший ток небаланса, так как в его создании участвуют только два трансформатора, находящиеся в одинаковых магнитных условиях, если не учитывать возмож-

ности появления в их сердечниках разного остаточного намагничивания. Это остаточное намагничивание у трансформаторов одной и той же фазы создается одинаковым сквозным сверхтоком и поэтому должно быть одинаково. Однако на практике необходимо считаться с возможностью снижения остаточной индукции у отдельных трансформаторов из-за температурных колебаний, механических вибраций и т. д.

Ток небаланса в реле схемы 3 будет равен сумме токов небаланса отдельных фаз схемы 2. Предположим, что токи небаланса в фазах схемы 2 положительны и на векторной диаграмме рис. 2а изображаются векторами $i_{нб1}$, $i_{нб2}$ и $i_{нб3}$, тогда ток в нулевом проводе (а следовательно, и в реле схемы 3) изобразится вектором $i_{нб}^{(3)}$. Такое соотношение токов небаланса мы будем иметь в том случае, когда все трансформаторы схемы будут находиться в одинаковом магнитном состоянии и когда один из комплектов трансформаторов (нулевой или внешний) будет иметь более высокий класс точности или когда один из комплектов более загружен, чем второй. При этих условиях ток $i_{нб}^{(3)}$ будет иметь наименьшие значения. В частном случае, когда токи $i_{нб1}$, $i_{нб2}$ и $i_{нб3}$ будут составлять симметричную систему вектора, ток $i_{нб}^{(3)}$ будет равен нулю.

При одинаковой точности и нагрузке комплектов трансформаторов токи небаланса в фазах будут меньше и с одинаковой вероятностью могут иметь знак плюс или минус, поэтому наиболее вероятным является такое положение, когда два из этих токов будут иметь один знак, а третий ток будет иметь обратный знак (рис. 2б). В этом случае ток $i_{нб}$ будет примерно в два раза больше токов небаланса в фазах. Таково соотношение между токами небаланса, протекающими через реле в схемах 2 и 3.

В создании тока небаланса схемы 1 участвуют четыре трансформатора. Внешние трансформаторы генерируют ток небаланса, содержащий все гар-

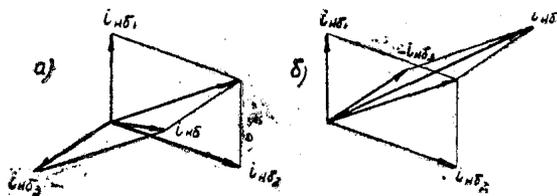


Рис. 2

моники. Магнитное состояние этих трансформаторов будет разное, несмотря на симметричность нагрузки генераторов, из-за появления в их сердечниках под действием сквозных асимметричных сверхтоков остаточного намагничивания. Величина этого намагничивания у отдельных трансформаторов будет разная и будет меняться после каждого случая протекания

сверхтока, в связи с этим и ток небаланса внешних трансформаторов будет резко менять свою величину и фазу.

Нулевой трансформатор будет генерировать в цепь защиты только гармоники кратные трем. Ввиду того, что рассматриваемая схема соединена на циркуляцию третьих гармоник, ток нулевого трансформатора будет компенсировать часть этих гармоник, содержащихся в токе небаланса внешних трансформаторов (ту часть третьих гармоник, которая трансформируется из первичной цепи), и будет отсасывать на себя часть тока остальных гармоник. Из этого вытекает, что нулевой трансформатор уменьшает ток небаланса внешних трансформаторов, попадающий в реле.

Попытаемся теперь установить соотношение между токами небаланса схем 1, 2 и 3. Наиболее просто можно установить соотношение между токами небаланса схем 1 и 3. Действительно, схему 3 мы можем рассматривать состоящей из двух фильтров токов нулевой последовательности (аналогичных схемвнешних трансформаторов схемы 1), соединенных относительно реле на циркуляцию. Каждый из этих фильтров имеет свой ток небаланса, соизмеримый с током небаланса внешних трансформаторов схемы 1.

Если мы обозначим токи небаланса отдельных фильтров схемы 3 через $i'_{нб}$ и $i''_{нб}$, то ток в реле будет меняться в следующих пределах:

$$i_p = i_{нб}^{(3)} = i'_{нб} + i''_{нб},$$

при этом оба предела имеют одинаковую вероятность.

Предположим теперь, что токи небаланса отдельных фильтров схемы 1 и 3 одинаковы, тогда ток в реле схемы 3 будет в два раза больше тока в реле схемы 1. Но выше мы получили такое же соотношение для токов небаланса в реле для схем 2 и 3. На основании этого можно сделать вывод, что в отношении токов небаланса схемы 1 и 2 примерно равноценны. Однако на практике можно ожидать, что схема 2 будет иметь наименьший ток небаланса из всех рассматриваемых схем.

Зависимость тока небаланса рассматриваемых схем защиты от сопротивления реле

Зависимость тока небаланса от сопротивления реле при расчете защит от замыкания на землю в настоящее время не учитывается, а между тем, как будет показано ниже, эта зависимость весьма значительна и пренебречь ею нельзя.

Указанная выше зависимость для продольной дифференциальной защиты генераторов (схема 2, рис. 1) может быть получена из известного выражения для тока небаланса этой схемы¹

$$i_{нб} = \frac{I_1(z_{н1}z_2 - z_{н2}z_1)}{z_p(z_{н1} + z_1 + z_{н2} + z_2) + (z_{н1} + z_1)(z_{н2} + z_2)}. \quad (1)$$

Сопротивления холостого хода трансформаторов, входящие в знаменатель выражения (1), можно считать равными:

$$z_{н1} + z_1 = z_{н2} + z_2 = z_x. \quad (2)$$

Тогда выражение (1) примет следующий вид:

$$i_{нб} = \frac{I_1(z_{н1}z_2 - z_{н2}z_1)}{z_x(z_x + 2z_p)}. \quad (2)$$

На основании этого выражения искомая зависимость $i_{нб} = f(z_p)$ для рассматриваемой схемы может быть представлена в следующем виде:

$$i_{нб1} = i_{нб2} \frac{z_x + 2z_{p2}}{z_x + 2z_{p1}}. \quad (3)$$

Аналогичную зависимость можно получить и для трехфазного фильтра токов нулевой последовательности, приведенного на рис. 3а.

Воспользовавшись методом суперпозиции, предположим, что в первичной цепи протекает ток только по фазе А. Тогда схема замещения фильтра примет вид, показанный на рис. 3б.

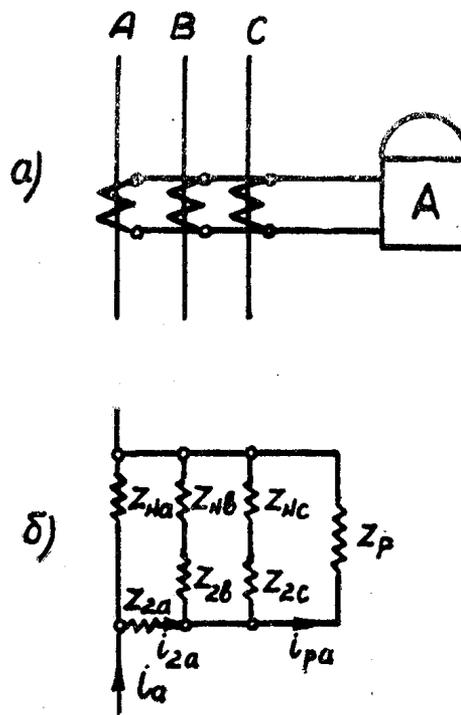


Рис. 3

¹ См., например, „Руководящие указания“. Изд. 1939 г. раздел Т--2.

Для упрощения решения задачи будем считать (аналогично предыдущему) полные сопротивления холостого хода трансформаторов равными:

$$z_{на} + z_{2а} = z_{нв} + z_{2в} = z_{нс} + z_{2с} = z_x. \quad (4)$$

Вторичный ток фазы *A* на основании указанной схемы замещения будет равен:

$$i_{2а} = \frac{i_a z_{на}}{z_{на} + z_{2а} + \frac{z_x z_p}{z_x + 2z_p}} = \frac{i_a z_{на} (z_x + 2z_p)}{z_x (z_x + 3z_p)}. \quad (5)$$

Ток в реле от фазы *A*:

$$i_{ра} = i_{2а} \frac{z_x}{z_x + 2z_p} \quad (6)$$

или с учётом выражения (5):

$$i_{ра} = \frac{i_a z_{на} (z_x + 2z_p)}{z_x (z_x + 3z_p)} \cdot \frac{z_x}{z_x + 2z_p} = \frac{i_a z_{на}}{z_x + 3z_p}. \quad (7)$$

Выражения, подобные (7), можно получить и для токов в реле *i_{рв}* и *i_{рс}*, если предполагать протекание первичного тока поочередно в фазах *B* и *C*.

Полный ток в реле схемы рис. 2а будет равен сумме токов *i_{ра}*, *i_{рв}*, *i_{рс}* и будет являться током небаланса этой схемы:

$$i_{нб} = i_{ра} + i_{рв} + i_{рс} = \frac{i_a (z_{на} + a^2 z_{нв} + a z_{нс})}{z_x + 3z_p}, \quad (8)$$

где *a* — оператор трёхфазного тока.

На основании выражения (8) искомая зависимость *i_{нб} = f(z_p)* может быть представлена в следующем виде:

$$i_{нб1} = i_{нб2} \frac{z_x + 3z_{p2}}{z_x + 3z_{p1}}. \quad (9)$$

Пользуясь данной методикой, можно получить зависимость *i_{нб} = f(z_p)* и для схемы 1 рис. 1, которая имеет следующий вид (при условии равенства сопротивлений холостого хода всех четырёх трансформаторов):

$$i_{нб2} = i_{нб1} \frac{z_x + 4z_{p2}}{z_x + 4z_{p1}}. \quad (10)$$

Подобно этому для схемы 3 рис. 1:

$$i_{нб1} = i_{нб2} \frac{z_x + 6z_{p2}}{z_x + 6z_{p1}}. \quad (11)$$

Полученная зависимость *i_{нб} = f(z_p)* может быть выражена в общем виде:

$$i_{нб1} = i_{нб2} \frac{z_x + m z_{p2}}{z_x + m z_{p1}}, \quad (12)$$

где *m* — число трансформаторов, участвующих в генерации данного тока небаланса.

Приведённые выше выводы в отношении зависимости *i_{нб} = f(z_p)* очень хорошо согласуются с опытом.

Основы расчета рассматриваемых защит

Рассмотрим вначале общие положения расчёта рассматриваемых защит.

Ввиду того, что чувствительность защиты часто бывает ограничена максимально допустимым током в дуге в месте пробоя изоляции (150—200 *a*), расчёт защиты должен быть построен на достижении оптимальных условий, при которых заданной мёртвой зоне соответствует минимальный первичный ток трогания. Это условие удовлетворяется при сопротивлении обмотки реле, равном сумме сопротивлений холостого хода трансформаторов тока, питающих данное реле ¹⁾

$$z_p = \Sigma(z_x) \quad (13)$$

Указанная сумма $\Sigma(z_x)$ представляет полное сопротивление схемы защиты току, который вызывала бы э.д.с., введённая в схему вместо реле. Так, например, для схемы 1, рис. 1, $\Sigma(z_x) = z_x : 4$; для схемы 2— $\Sigma(z_x) = z_x : 2$ и для схемы 3— $\Sigma(z_x) = z_x : 6$.

Ток трогания реле должен быть больше тока небаланса при токе блокировки в первичной цепи:

$$i_{pT} = k_n i_{нбб} \quad (14)$$

Ток небаланса при токе блокировки (если пренебречь импедансными углами при сложении сопротивлений):

$$i_{нбб} = I_{нбн} \frac{z_n + m z_n}{z_n + m z_p} \left(\frac{I_0}{I_{нТ}} \right)^\alpha \quad (15)$$

где k_n — коэффициент надёжности;

$i_{нбн}$ — ток небаланса в цепи реле при первичном токе, равном номинальному току трансформаторов $I_{нТ}$;

z_n — сопротивление цепи намагничивания трансформатора при номинальном токе в его первичной цепи;

z_p — сопротивление измерительного прибора, которым измерен ток небаланса $i_{нбн}$;

I_0 — первичный ток блокировки.

В правую часть выражения (15) может быть подставлен ток небаланса, замеренный при некотором токе генератора I_g , тогда и в знаменателе дроби нужно подставить этот ток.

Ток в реле при замыкании на землю в зоне защиты:

$$i_p = \frac{I_{зм} b k_0}{n_T} - i_{нбр} \quad (16)$$

При $i_p = i_{pT}$ из выражения (16) можно определить ток $I_{зм}$ или величину мёртвой зоны b_0 :

$$I_{зм} = \frac{(i_{pT} + i_{нбр}) n_T}{b_0 k_0} \quad (17)$$

где $I_{зм}$ — максимальный ток замыкания на землю, обеспечивающий требуемую чувствительность защиты;

k_0 — коэффициент отсоса;

n_T — коэффициент трансформации трансформаторов тока;

b_0 — величина мёртвой зоны и

¹⁾ См. статью Г. В. Зевеке „Дифференциальные защиты электрических машин“ „Электрические станции“, № 1, 1940.

$i_{нбр}$ — ток небаланса в цепи реле при расчётном режиме, определяемый из следующего выражения:

$$i_{нбр} = i_{нбн} \frac{z_{xp} + mz_n}{z_{xp} + mz_p} \left(\frac{I_p}{I_{нГ}} \right)^{\alpha}, \quad (18)$$

где I_p — расчётный первичный ток нагрузки генератора, при котором определяется чувствительность защиты. Этот ток находится в пределах номинального тока генератора,

z_{xp} — сопротивление цепи намагничивания трансформатора при расчётном токе в первичной цепи.

Следует отметить здесь, что большинство авторов и „Руководящие указания по релейной защите“ 1948 года рекомендуют подставлять в выражение (17) ток небаланса при токе блокировки, что приводит к необоснованному завышению $I_{зм}$.

Коэффициент отсоса определяется из следующего выражения:

$$k_o = \frac{z_{xp}}{z_{xp} + mz_p}, \quad (19)$$

где m — число трансформаторов тока (с одинаковым z_x), питающих реле.

Выражение (19) легко получить, если воспользоваться методикой, применённой для вывода выражения (7).

Определим теперь расчётный режим работы генератора, при котором ток $I_{зм}$ имеет наибольшее значение. Преобразуем для этого выражение (17) с учётом (18) и (19):

$$\frac{I_{зм}}{n_T} = i_{зм} = \frac{i_{pГ}}{b_o} \left(1 + m \frac{z_p}{z_{xp}} \right) + \frac{i_{нбн}}{b_o} \left(1 + m \frac{z_n}{z_{xp}} \right) \left(\frac{I_p}{I_{нГ}} \right)^{\alpha}. \quad (20)$$

В выражении (20) сопротивление z_{xp} также является функцией тока I_p , имея от него прямую зависимость. В результате этого первый член и первый множитель в скобках второго члена правой части этого выражения в функции от $\left(\frac{I_p}{I_{нГ}} \right)$ графически представляются ниспадающими кривыми. Второй множитель второго члена с ростом $\left(\frac{I_p}{I_{нГ}} \right)$ бесконечно возрастает. Поэтому выражение (20), как функция $I_{зм} = f \left(\frac{I_p}{I_{нГ}} \right)$, при положительных значениях независимого переменного, максимума не имеет, а имеет всего один минимум. Отсюда вытекает, что расчётным режимом работы генератора для определения чувствительности защиты может быть один из крайних режимов: холостой ход или номинальная нагрузка, так как все промежуточные режимы должны дать ток $I_{зм}$, меньший чем при одном из этих крайних.

Выражение (20) для холостого хода генератора:

$$I_{зм0} = \frac{i_{pГnГ}}{b_o} \left(1 + m \frac{z_p}{z_o} \right). \quad (21)$$

То же при номинальной нагрузке генератора:

$$I_{змн} = n_T \left[\frac{i_{pГ}}{b_o} \left(1 + m \frac{z_p}{z_n} \right) + \frac{i_{нбн}}{b_o} \left(1 + m \frac{z_n}{z_n} \right) \left(\frac{I_{н2}}{I_{нГ}} \right)^{\alpha} \right], \quad (22)$$

где $I_{н2}$ — номинальный ток генератора,

z_0 — сопротивление цепи намагничивания трансформатора тока при холостом ходе генератора и

z_n — то же при номинальной нагрузке генератора.

Если для выполнения защиты применяются реле с оптимальным сопротивлением обмотки, подчиняющимся выражению (13), а именно:

$$z_p = \frac{z_n}{m}, \quad (23)$$

то выражения (21) и (22) несколько упрощаются и принимают следующий вид:

а) для холостого хода генератора

$$I_{змо} = \frac{i_{eT} n_T}{v_0} \left(1 + \frac{z_n}{z_0} \right); \quad (24)$$

б) для номинальной нагрузки генератора:

$$I_{змн} = \frac{n_T}{b_0} \left[2l_{pT} + i_{нбн} \left(1 + \frac{z_n}{z_p} \right) \left(\frac{I_{нз}}{I_{нT}} \right)^\alpha \right]. \quad (25)$$

Полученные выше выражения (14), (15), (21), (22) и (23) являются основными расчетными формулами, одинаковыми для всех трех рассматриваемых схем. В том случае, когда удастся выполнить условие (23), формулы (21) и (22) можно заменить формулами (24) и (25).

Для иллюстрации рекомендуемого метода расчета и для сравнения рассматриваемых трех схем ниже приводится в виде таблицы пример расчета защиты во всех трех вариантах для генераторов с номинальными токами 344, 825 и 2860 *a*. При этом, для генераторов с номинальным током 2860 *a*, имеющих защиту по схеме 2 или 3, расчет сделан в двух вариантах: для трансформаторов тока с коэффициентом трансформации 3000/5 *a* (результаты расчета записаны в первой строке каждой позиции) и 3000/10 *a* (результаты расчета во второй строке каждой позиции).

Как видно из позиций 11 и 15 указанной таблицы, максимальный ток замыкания на землю $I_{зм}$ для всех трех схем при одинаковом коэффициенте трансформации и оптимальных параметрах реле практически одинаков, что говорит об одинаковой чувствительности рассматриваемых схем.

Как видно из позиции 5, во всех вариантах схем принят одинаковый максимальный ток небаланса. Это обстоятельство не может явиться основанием для сомнения в возможности такого сравнения схем, так как действительный ток небаланса может быть снижен практически до одинаковой величины для любой из схем рис. 1.

Выводы

Из сравнения результатов расчета, приведенных в таблице, видно, что при применении реле с оптимальными параметрами чувствительность всех трех вариантов схем практически одинакова (см. позиции 11 и 15) и вполне достаточна для всего диапазона мощностей генераторов (от 3 до 50 *мвт*), могущих работать параллельно на генераторном напряжении. В связи с этим отпадает необходимость в устройстве специальной защиты генераторов от замыканий на землю, так как роль ее может выполнить обычная продольная дифференциальная защита по схеме 2 или 3. Это значительно упростит защиту генератора и позволит сэкономить на ее выполнении четыре трансформатора тока и контрольно-измерительный кабель.

Использование схемы 2 с оптимальными сопротивлениями дополнительных реле практически невозможно ввиду большой величины этих сопро-

	Наименование определяемой величины	Обозначение определяемой величины	Формула, употребляемая для расчета	Номинальный ток генератора 344 а	
				Схема 1	Схема 2
1	Коэффициент трансформации трансформаторов тока	n_T	Справочн.	400 5	400 5
2	Сопротивление вторичной цепи трансформаторов, включая и сопротивление соединительных проводов для схем 2 и 3	z_2	Справочн.	0.36	0.46
3	Импедансный коэффициент цепи намагничивания трансформаторов тока при номинальной нагрузке	A_H	Справочн.	51	51
4	То же, как в поз. 3, но при холостом ходе генератора	A_0	Справочн.	37	37
5	Ток небаланса при номинальной нагрузке трансформаторов тока	$i_{нбн}$	Справочн.	0.01	1.01
6	Вторичная э. д. с. трансформаторов при номинальной нагрузке генератора	e_2	$z_2 \frac{I_{нг}}{n_T}$	1.42	1.85
7	Сопротивление ветви намагничивания трансформаторов тока при номинальной нагрузке генератора	z_H	$A_H E_2^{1/3}$	56	62.6
8	Оптимальное сопротивление обмотки реле по выражению (23)	z_p	$\frac{z_H}{m}$	14	31.3
9	Ток небаланса при токе блокировки при коэффициенте блокировки $K_b=1,4$	$i_{нбб}$	Выражение (15)	0.0085	0.0073
10	Ток трогания реле при коэффициенте надёжности $K_H=1,5$	i_{pT}	$K_H i_{нбб}$	0.013	0.011
11	Ток I_{3M} , необходимый для обеспечения чувствительности $b_0=0,3$ при номинальной нагрузке генератора	I_{3M}	Выражение (25)	10.2	8.6
12	Мощность в $ва$, потребляемая реле при токе трогания	s_p	$z_p i_{pT}^2$	0.0024	0.0038
13	Вторичная э. д. с. трансформатора при холостом ходе генератора и при замыкании на землю на границе мертвой зоны	e_{20}	$z_p i_{pT}$	0.182	0.345
14	Сопротивление ветви намагничивания трансформаторов при холостом ходе генератора	z_0	$A_0 E_{20}^{1/3}$	21	26
15	Ток I_{3MO} , необходимый для обеспечения чувствительности $b_0=0,3$ при холостом ходе генератора	I_{3MO}	Выражение (24)	12.7	10.0

Схема 3	Номинальный ток генератора 825 а			Номинальный ток генератора 286 а		
	Схема 1	Схема 2	Схема 3	Схема 1	Схема 2	Схема 3
400/5	1000/5	1000/5	1000/5	3000/10	3000/5 3000/10	3000/5 3000/10
0.43	0.44	0.54	0.54	0.38	1.0 0.48	1.0 0.48
51	80	80	80	100	300 100	300 100
37	62	62	62	70	210 70	210 70
0.01	0.01	0.01	0.01	0.012	0.016	0.112
1.85	1.82	2.23	2.23	3.66	4.77 4.57	4.77 4.57
62.6	98	104	104	153	505 166	505 166
10.4	24.5	52	17.3	38.2	252.5 83	84 27.7
0.0093	0.0075	0.0069	0.0081	0.0084	0.0076 0.008	0.008 0.009
0.014	0.011	0.0010	0.012	0.013	0.011 0.012	0.012 0.009
11.0	21.7	20.0	23.6	39.3	63.0 36.0	71.5 40.0
0.0020	0.0030	0.0052	0.0025	0.0065	0.030 0.010	0.012 0.007
0.146	0.27	0.52	0.208	0.50	2.78 1.0	1.01 0.36
19.5	40	50	37	55	295 70	210 50
15.6	25.3	20.0	30.5	49.3	59.6 40	71.5 56

тивлений, так как при междуфазных повреждениях в зоне дифференциальной защиты напряжение на клеммах этих реле может достигать опасных величин. Однако эту схему легко осуществить при помощи трех ваттметровых реле типа ИМ—143 (см. рис. 4), обмотки напряжения которых необходимо питать соответствующими фазными напряжениями от измерительных трансформаторов напряжения, а токовые обмотки включаются последовательно с основными реле защиты. При этом расчетный ток трогания реле определяется по следующей формуле: *

$$i_{рТ} = \frac{p_{рщ} \sqrt{3} n_n}{U_{нг}}, \quad (26)$$

где $p_{рщ}$ — мощность трогания реле, при которой оно используется,

$U_{нг}$ — номинальное напряжение генератора,

n_n — коэффициент трансформации трансформатора напряжения.

Расчетное сопротивление обмотки реле будет равно сопротивлению токовой обмотки при выбранном соединении ее секций.

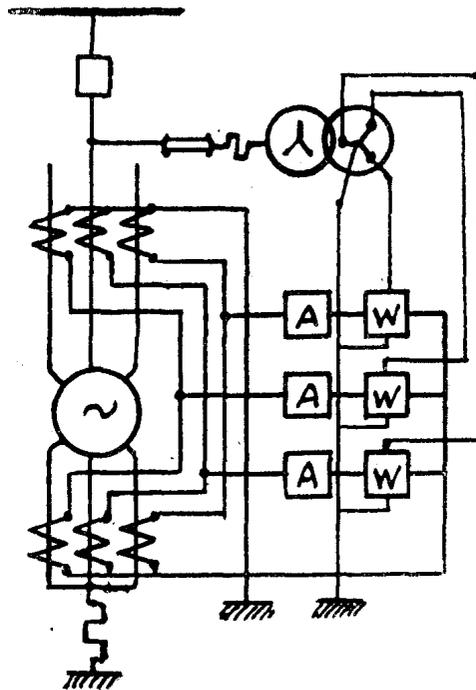


Рис. 4

Использование ваттметровых реле в этой схеме несколько ее усложнит, но зато повысит ее чувствительность по сравнению с полученной в приведенном выше расчете.

Схему 3 можно осуществить при помощи простого токового реле высокой чувствительности. Такое реле разработано в релейной лаборатории Томского политехнического института. Оно потребляет мощность при минимальном токе трогания не более 0,002 *ва*.

В заключение необходимо отметить, что предлагаемый нами в настоящей статье метод расчета является более точным и простым по сравнению с рекомендуемым „Руководящими указаниями по релейной защите“, изд. 1948. г.