

О ЗАЩИТЕ ГЕНЕРАТОРОВ ОТ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ ПРИ ПОМОЩИ КАБЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

И. Д. КУТЯВИН

В связи с решением Техотдела МЭС о режиме заземления нулевых точек и защите от замыкания на землю в сетях 2—35 кВ (см. хронику в № 10 „Электрических станций“ за 1949 г.) весьма широкое распространение должна получить защита генераторов от замыкания на землю с использованием кабельных трансформаторов тока.

Как известно, осуществление этого вида защиты для генераторов, имеющих связь с распределительным устройством несколькими кабелями или шинами, встречало затруднения. Эти затруднения, повидимому, удалось преодолеть работникам института электротехники Академии наук УССР (см., например, статью И. М. Сирота „Проверка новой защиты генератора от замыканий на землю“ в № 6 „Электрических станций“ за 1949 г.) путем применения

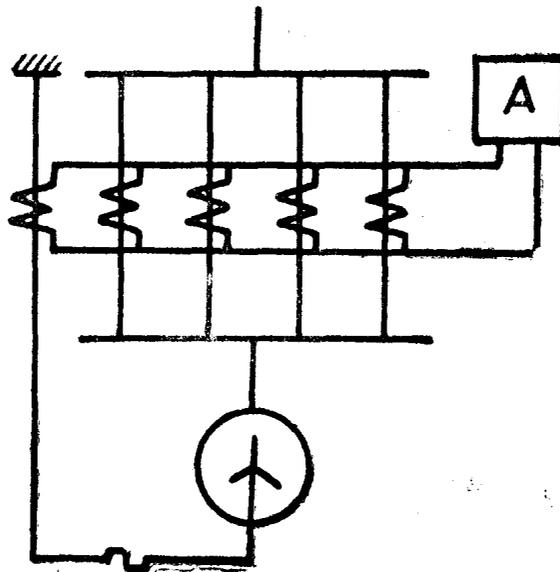


Рис. 1

общего кабельного трансформатора, охватывающего весь пучок кабелей. Подобный трансформатор, как указывает И. М. Сирота, может с успехом применяться и для генераторов, соединенных с распределительным устройством шинами.

Наряду с этим находит также применение защита с индивидуальными кабельными трансформаторами. Аналогичная защита описана В. Е. Казанским (см. № 3 „Электрических станций“ за 1949 г.), рекомендуя весьма оригинальную схему с подмагничиванием от нулевого трансформатора. Однако с успехом может применяться и простейшая схема с индивидуальными трансформаторами в виде дифференциальной токовой защиты нулевой последовательности, изображенной на рис. 1. Для осуществления данной

защиты генератора с заземленным нулем на заземляющий провод и на каждый кабель, соединяющий генератор с распредустройством, одеваются одинаковые кабельные трансформаторы с равными коэффициентами трансформации. Вторичные обмотки этих трансформаторов соединяются на суммирование тока и приключаются к реле защиты.

Схема замещения защиты показана на рис. 2, где z_n — сопротивление ветви намагничивания трансформаторов, z_1, z_2, \dots — сопротивления соеди-

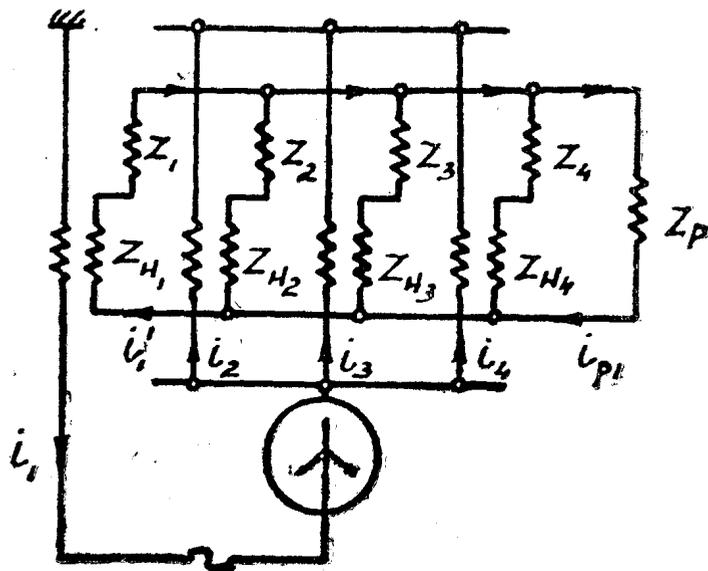


Рис. 2

тельных проводов и вторичных обмоток трансформаторов, z_p — сопротивление обмотки реле, i_1 — ток в заземляющем проводе, i_2, i_3 — токи нулевой последовательности в кабелях и i_{pr} — ток в реле. Все величины приведены к вторичному числу витков трансформаторов.

Ток небаланса защиты

Ток небаланса рассматриваемой схемы состоит из трех составляющих: из тока небаланса i_{nb1} , обусловленного током нагрузки генератора, из тока i_{nb2} , вызываемого погрешностями кабельных трансформаторов в трансформации сквозного активного тока нулевой последовательности (имеет место только для генераторов с заземленным нулем), и из тока i_{nb3} , равного трансформированному емкостному току нулевой последовательности, определяемому емкостью цепи генератора, находящейся в зоне защиты.

Ток i_{nb1} при нормальной работе генератора очень мал, поэтому им можно пренебречь, если защита снабжена блокировкой от сверхтоков. В случае отсутствия такой блокировки ток i_{nb1} при сквозных сверхтоках в первичной цепи может достигать больших значений и существенно влиять на величину тока трогания. Однако при увеличении числа кабелей генератора и при сквозном сверхтоке ток i_{nb1} будет уменьшаться ввиду того, что токи небаланса отдельных трансформаторов, имея произвольную фазу, будут компенсировать друг друга.

Токи i_{nb2} и i_{nb3} создаются токами нулевой последовательности и от нагрузки генератора не зависят. Суммарную величину этих двух токов можно весьма просто определить из опыта. Для этого необходимо заземлять поочередно каждую фазу генератора вне зоны защиты, поднимать его напряжение до номинального и при этом замерять ток небаланса. Наибольший из полученных трех токов и следует учесть при наладке защиты.

Токи небаланса $i_{нб2}$ и $i_{нб3}$ можно найти из опыта также путем пропускания по первичной цепи соответствующих токов, равных токам, их создающим.

Пользуясь схемой замещения рис. 2, можно получить также для токов $i_{нб2}$ и $i_{нб3}$ аналитические выражения. Рассмотрим сначала частный случай, когда в первичной цепи протекает ток только по заземляющему проводу. Тогда можно написать следующее уравнение:

$$(i_1 - i'_1) z_{н1} = i'_1 \left[z_1 + \frac{z_x \cdot z_p}{z_x + (m-1) z_p} \right], \quad (1)$$

где $z_x = z_{н1} + z_1 \cong z_{н2} + z_2 \cong z_{н3} + z_3 = \dots$ — сопротивление холостого хода трансформатора со стороны вторичной обмотки и m — число трансформаторов тока в схеме.

На основании (1) можно определить вторичный ток первого трансформатора

$$i'_1 = \frac{i_1 z_{н1} [z_x + (m-1) z_p]}{z_x (z_x + m z_p)}. \quad (2)$$

Ток в реле от нулевого трансформатора

$$i_p = \frac{i'_1 z_x}{z_x + (m-1) z_p} = \frac{i_1 z_{н1}}{z_x + m z_p}. \quad (3)$$

Аналогичные выражения токов в реле можно получить и для других трансформаторов. Тогда полный ток в реле на основании схемы замещения рис. 2:

$$i_{нб2} = i_{p1} - (i_{p2} + i_{p3} + \dots) = \frac{i_1 z_{н1} - (i'_2 z_{н2} + i'_3 z_{н3} + \dots)}{z_x + m z_p}. \quad (4)$$

В выражении (4) сумма токов i'_2, i'_3, i'_4, \dots равна току i_1 , так как ток $i_{нб2}$ создается сквозным активным током нулевой последовательности.

Если сопротивления $z_{н2}, z_{н3}, z_{н4}, \dots$ положить равными некоторому среднему $z_{нсп}$, то для $i_{нб2}$ получим следующее выражение:

$$i_{нб2} = \frac{i_1 (z_{н1} - z_{нсп})}{z_x + m z_p} = \frac{I_{3мв} (z_{н1} - z_{нсп})}{n_T (z_x + m z_p)}. \quad (5)$$

Этим же путем можно получить выражение для $i_{нб3}$, имеющее следующий вид:

$$\begin{aligned} i_{нб3} &= \frac{i''_2 z_{н2} + i''_3 z_{н3} + \dots + z_{нm} i_m}{z_x + m z_p} = \\ &= \frac{i_{с2} z_{нсп}}{z_x + m z_p} = \frac{I_{с2} v z_{нсп}}{n_T (z_x + m z_p)}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $I_{3м}$ — максимальный ток заземления, обусловленный сопротивлением,

$I_{с2}$ — емкостный ток, затекающий в зону защиты при замыкании вне зоны,

v — относительное число замкнувшихся на землю витков,

n_T — коэффициент трансформации трансформаторов,

i''_2, i''_3, \dots — емкостные составляющие токов i_2, i_3, i_4, \dots

$i_{с2} = i''_2 + i''_3 + i''_4 + \dots$ — суммарный емкостный ток, обусловленный емкостью цепи генератора.

Ввиду того, что токи $i_{нб1}$ и $i_{нб2}$ могут иметь произвольную фазу, полный ток небаланса может быть равен сумме всех трех составляющих:

$$i_{нб} = i_{нб1} + i_{нб2} + i_{нб3}. \quad (7)$$

Если защита снабжается блокировкой от сверхтоков, ток $i_{нб1}$ в выражении (7) можно не учитывать. Кроме того, для генераторов с изолированным нулем ток $i_{нб2}$ равен нулю.

Ток $i_{нб3}$ также можно уменьшить до весьма малой величины путем исключения из зоны защиты кабелей генератора. Технически это осуществляется путем установки трансформаторов на генераторных концах кабелей, а заземление брони кабеля пропускается через окно трансформатора. Далее такая установка трансформаторов сводит до минимума длину соединительных проводов и тем самым уменьшает ток $i_{нб2}$.

Расчет защиты

Ток трогания реле рассматриваемой защиты должен быть больше максимального тока небаланса, появляющегося в реле при отсутствии повреждения в зоне защиты:

$$i_{pm} = K_n i_{нб}, \quad (8)$$

где $K_n > 1$ — коэффициент надежности.

При замыкании на землю в защищаемой зоне ток в реле будет иметь следующее выражение (оно может быть получено так же, как и (4)):

$$i_p = \frac{v z_n I_d}{n_T (z_x + m z_p)} - i_{нб1}, \quad (9)$$

где I_d — ток в дуге в месте пробоя изоляции,

v — число замкнувшихся на землю витков и

n_T — коэффициент трансформации кабельных трансформаторов.

В выражении (9) следует учитывать ток небаланса $i_{нб1}$, соответствующий номинальной нагрузке генератора, тогда как в выражения (7) и (8) этот ток $i_{нб1}$ нужно подставлять при наличии блокировки от сверхтоков — соответствующий току блокировки, а при отсутствии блокировки — соответствующий сквозному сверхтоку в первичной цепи. Следует подчеркнуть здесь, что ни один из авторов, рассматривающих расчет защиты от замыкания на землю, а также и „Руководящие указания по релейной защите“ 1948 г. не делают этой разницы в учете тока небаланса при замыкании на землю в зоне защиты и вне ее, что является ошибкой.

Ввиду того, что при номинальной нагрузке генератора ток $i_{нб1}$ очень мал, его можно не учитывать в выражении (9).

Максимальный ток замыкания на землю, необходимый для обеспечения мертвой зоны v_0 при $i_p = i_{pm}$:

$$I_{3м} = \frac{i_{pm} n_T (z_x + m z_p)}{v_0 z_n}. \quad (10)$$

Минимальная мертвая зона защиты при токе замыкания на землю равном $I_{дм}$:

$$v_{0м} = \frac{i_{pm} n_T (z_x + m z_p)}{z_n I_{дм}}, \quad (11)$$

где $I_{дм}$ — максимальный ток в дуге.

Оптимальное сопротивление обмотки реле:

$$z_p = \frac{z_x}{m}. \quad (12)$$

Пример. Произвести расчет защиты генератора, имеющего 10 кабелей и заземленный нуль. Кабельные трансформаторы имеют постоянную $A = 40$ и $n_T = 25$. Максимальный ток небаланса при сквозном коротком с одновременным замыканием на землю составляет 20 ма. Для защиты предполагается использовать реле с $z_p = 10$ ом и с пределами $i_{pm} = 5 \div 100$ ма. Ток трогания реле при $K_n = 2$:

$$i_{pm} = 2 \cdot 0,02 = 0,04 \text{ а.}$$

Напряжение на клеммах реле при токе трогания

$$U_p = i_{pm} z_p = 10 \cdot 0,04 = 0,4 \text{ в.}$$

Сопротивление ветви намагничивания трансформатора

$$z_n = A U_p^{1/3} = 40 \cdot 0,4^{1/3} = 30 \text{ ом.}$$

Ток замыкания на землю, необходимый для обеспечения $\alpha_0 = 0,3$

$$I_{3n} = \frac{0,04 \cdot 25 (30 + 11 \cdot 10)}{0,3 \cdot 30} = 15,6 .$$
