

Совершенствование защиты блока генератор—трансформатор от замыканий на землю

БУЛЫЧЕВ А.В., ВАНИН В.К.

Рассмотрены пути повышения эффективности защиты блока генератор—трансформатор от однофазных замыканий на землю. Предложены методы, позволяющие не только контролировать сопротивление изоляции сети с изолированной нейтралью при работающем оборудовании, но и определять характер процесса ее ухудшения и место возникновения повреждения. Методы основаны на анализе сигналов, формируемых с помощью высоковольтного коммутатора. Предложены схемы устройств, реализующих методы, и рекомендации по их использованию.

Ключевые слова: сети, блоки генератор—трансформатор, защита от замыканий на землю

Действия средств защиты от однофазных замыканий на землю в цепях статора с изолированной нейтралью, на которые возлагаются ответственные функции предупреждения аварий, могут стать более эффективными, если применить специальные наиболее продуктивные алгоритмы работы.

Хорошие перспективы открывают коммутационные методы, своеобразие которых проявляется в способности контролировать состояние изоляции в нормальных условиях и определять характер и место возникновения повреждения в аварийных ситуациях.

Эти методы основаны на анализе сигналов, формируемых с помощью коммутатора в специально созданных цепях, соединяющих защищаемую сеть генераторного напряжения с землей.

На рис. 1 показана схема замещения контролируемой сети генераторного напряжения с коммутатором, выполненным на основе трех диодных ключей V_1, V_2, V_3 .

С помощью коммутатора выбирается фаза с наибольшим напряжением относительно земли и соединяется с землей через ограничительное

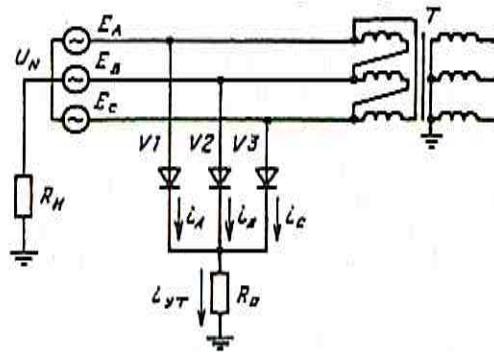


Рис. 1

Ways for increasing the effectiveness of the «generator-transformer» unit single-phase earth-fault protections are considered. Methods are proposed which make it possible not only to check the insulation of a network with insulated neutral when equipment is in operation but also to determine the character of the insulation deterioration process and to detect damage location. The methods are based on an analysis of signals formed with the help of a high-voltage switchgear. Schemes of devices which realize the methods proposed and recommendations on their use are given.

Ключевые слова: сети, блоки генератор—трансформатор, защита от замыканий на землю

сопротивление R_o . В результате по сопротивлению R_o протекает ток утечки, интегральное значение и форма которого зависят от сопротивления изоляции и места повреждения. Используя этот ток в качестве полезного сигнала, можно оценивать состояние изоляции в нормальных условиях и определять место повреждения в аварийных ситуациях с достаточной для целей релейной защиты достоверностью.

В защищаемой цепи действуют ЭДС:

$$E_A = E_m \sin \omega t; \quad E_B = E_m \sin(\omega t - 2\pi/3);$$

$$E_C = E_m \sin(\omega t - 4\pi/3).$$

Здесь E_m и ω — амплитуды фазных ЭДС сети и их угловая частота.

В симметричном режиме работы при исправной изоляции всех фаз диодные ключи поочередно открываются и по сопротивлению R_o протекает ток утечки под действием фазных ЭДС (рис. 2, а). Среднее значение этого тока за период ЭДС

$$I_{\text{ут}}' = \frac{U_{\text{ср}}}{R_o} = \frac{3}{2\pi R_o} \int_{-\pi/3}^{+\pi/3} E_m \cos \omega t d\omega t = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi R_o} E_m,$$

где $U_{\text{ср}}$ — среднее значение падения напряжения на эквивалентном сопротивлении цепей утечки на землю; R_o — эквивалентное активное сопротивление электрических цепей утечки на землю: $R_o = R_u + R_o$; R_u — эквивалентное сопротивление изоляции защищаемой цепи относительно земли; R_o — сопротивление ограничительного резистора в устройстве.

Аналогично определяются средние значения

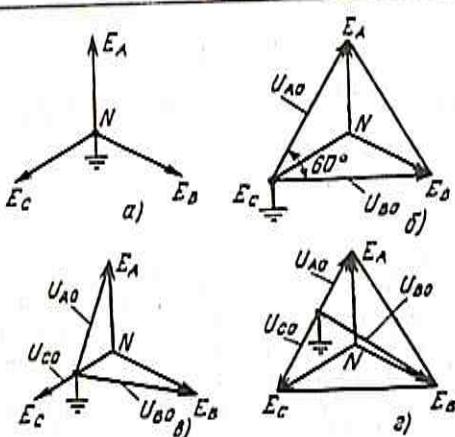


Рис. 2

тока утечки при симметричном снижении сопротивления изоляции и замыкании на землю в нейтрали обмотки статора. При однофазном замыкании на землю в защищаемой сети напряжение на этой фазе относительно земли равно нулю. Диодный ключ этой фазы шунтируется электрическим проводником, возникающим в месте повреждения, и по резистору R_o протекают токи утечки только двух неповрежденных фаз под действием двух линейных ЭДС. Например, при замыкании фазы С ток утечки обусловлен действием ЭДС E_{AC} и E_{BC} (рис. 2,б). Среднее значение тока утечки в этих условиях

$$I_{yt}'' = \frac{U_{sp}}{R_3} = \frac{1}{\pi R_3} \int_0^{\frac{2\pi}{3}} E_{lm} \sin \omega t d\omega t = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi R_3} E_m,$$

где E_{lm} — амплитуда линейной ЭДС.

Как видно, среднее за период значение тока утечки на землю не зависит от места повреждения

$$I_{yt}' = I_{yt}'' = I_{yt}$$

и в реальных условиях работы сети определяется практически эквивалентным сопротивлением цепей утечки. Его можно использовать для определения сопротивления изоляции контролируемой цепи относительно земли:

$$R_u = R_3 - R_o = \frac{3\sqrt{3}E_m}{2\pi I_{yt}} - R_o.$$

В случае повреждения изоляции в обмотке (например, в обмотке фазы С) напряжения фаз контролируемой сети относительно земли можно представить в тригонометрической форме следующим образом (рис. 2,в):

$$U_{A0} = E_m \sin \omega t - (1 - \alpha) E_m \sin (\omega t - 4\pi/3);$$

$$U_{B0} = E_m \sin (\omega t - 2\pi/3) - (1 - \alpha) E_m \sin (\omega t - 4\pi/3);$$

$$U_{C0} = \alpha E_m \sin (\omega t - 4\pi/3).$$

Здесь U_{A0} , U_{B0} , U_{C0} — напряжения фаз A, B, C сети относительно земли при повреждении в обмотке; α — расстояние (кратное числу витков обмотки) от фазного вывода поврежденной обмотки до места повреждения в этой обмотке, измеряемое в отн. ед.

При замыкании на землю в катушке CA обмотки трансформатора, соединенной треугольником, напряжения сети относительно земли можно представить так (рис. 2,в):

$$U_{Co,r} = \alpha [E_m \sin (\omega t - 4\pi/3) - E_m \sin \omega t];$$

$$U_{Ao,r} = (1 - \alpha) [E_m \sin (\omega t - 4\pi/3) - E_m \sin \omega t];$$

$$U_{Bo,r} = \alpha [E_m \sin (\omega t - 4\pi/3) - E_m \sin \omega t] +$$

$$+ [E_m \sin (\omega t - 2\pi/3) - E_m \sin (\omega t - 4\pi/3)].$$

На рис. 3,а показаны токи утечки при повреждениях в разных точках обмотки фазы С генератора, а на рис. 3,б — при повреждении в катушке CA обмотки трансформатора, соединенной треугольником. Как видно, форма тока утечки изменяется при изменении места повреждения.

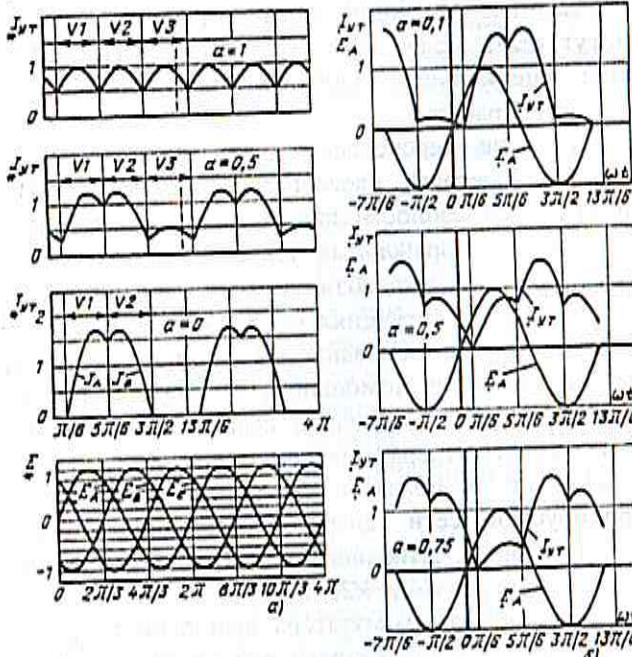


Рис. 3

Принимая во внимание то, что моменты преключения диодных ключей соответствуют углам ωt , равным $\pi/6$, $5\pi/6$, $3\pi/2$, $13\pi/6$ и т.п., средние значения токов утечки отдельных фаз (токов, протекающих по отдельным диодным ключам) при повреждении в обмотке статора генератора (соединенной звездой) равны:

$$I_A = \frac{3}{2\pi R_3} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} U_{A0} d\omega t = \frac{3E_m}{2\pi R_3} \left[\sqrt{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} (1 - \alpha) \right];$$

$$I_B = \frac{3}{2\pi R_s} \int_{5\pi/6}^{3\pi/2} U_{B0} d\omega t = \frac{3E_m}{2\pi R_s} \left[\sqrt{3} + \frac{\sqrt{3}}{2}(1-\alpha) \right];$$

$$I_C = \frac{3}{2\pi R_s} \int_{3\pi/2}^{13\pi/6} U_{C0} d\omega t = \alpha \sqrt{3} \frac{3E_m}{2\pi R_s}.$$

Здесь средние значения токов утечки двух исправных фаз равны, а среднее значение тока утечки поврежденной фазы меньше их. Только при $\alpha=1$ (замыкание в нейтрали) средние значения токов утечки всех фаз равны.

Отношение среднего значения тока утечки поврежденной фазы (наименьшего из средних значений токов утечки фаз) к среднему значению тока утечки за период равно расстоянию (числу витков) от фазного вывода поврежденной обмотки до места повреждения в обмотке (в отн. ед.):

$$I_C/I_{yt} = I_C/[(I_A + I_B + I_C)/3] = \alpha.$$

При повреждении в обмотке трансформатора (соединенной треугольником) средние значения токов утечки отдельных фаз определяются аналогично (см. рис. 3,б):

$$I_{At} = \frac{9\sqrt{3} E_m}{4\pi} (1 - \alpha); \quad I_{Bt} = \frac{9\sqrt{3} E_m}{4\pi};$$

$$I_{Ct} = \frac{9\sqrt{3} E_m}{4\pi} \alpha.$$

Эти значения не равны, но необходимо отметить, что в одном частном случае при $\alpha=0,5$ ток I_{At} равен I_{Ct} .

Одно из средних значений тока утечки (ток утечки исправной фазы) больше двух других (токов утечки фаз, связанных с поврежденной катушкой). При этом отношение наименьшего из трех среднего значения тока утечки фазы к среднему значению тока утечки за период пропорционально расстоянию от ближайшего фазного вывода до места повреждения, например:

$$I_{Ct}/I_{yt} = 3\alpha/2.$$

Здесь, как видно, в отношении содержится постоянный множитель $3/2$.

На рис. 4 представлена схема устройства, в котором используются отмеченные информативные свойства тока утечки. Для удобства анализа работы устройства на схеме дополнительно показаны первичные физические величины, которые представляются в реальном устройстве в определенном масштабе в виде вторичных сигналов.

Коммутатор выполнен на основе трех диодных столбов, аноды которых подключены к фазам сети, а катоды соединены между собой. После-

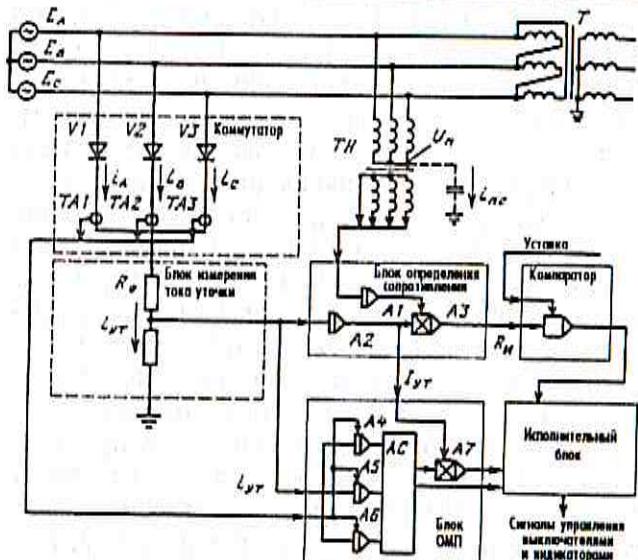


Рис. 4

довательная цепь, содержащая ограничительный резистор R_o и сопротивление шунга R_{sh} , соединяет катоды диодов с землей и обеспечивает ограничение максимального значения тока утечки на землю через коммутатор. Падение напряжения на сопротивление R_{sh} пропорционально току утечки и используется как полезный сигнал.

Операция усреднения тока утечки выполняется в блоке определения сопротивления с помощью интегратора $A1$, а среднее значение ЭДС сети определяется с помощью интегратора $A2$. В этом же блоке вычисляется отношение интегрального (среднего) значения ЭДС сети к среднему значению тока утечки. Для этого используется делитель сигналов $A3$. Датчиком фазных ЭДС в устройстве служит трансформатор напряжения (ТН) с обмотками, соединенными по схеме «звезда—звезда с нулем». Из полученного отношения и с учетом известного ограничительного сопротивления находится эквивалентное сопротивление изоляции сети относительно земли.

Эквивалентное сопротивление изоляции сравнивается компаратором с уставкой. Если оно оказывается меньше допустимого значения, то на выходе компаратора формируется дискретный сигнал, который передается в исполнительный блок, а аналоговый сигнал, пропорциональный току утечки, поступает на вход блока определения места повреждения.

В блоке определения места повреждения производится анализ формы тока утечки и по результатам этого анализа устанавливается место возникновения повреждения. В частности, определяются средние значения токов утечки каждой фазы. Для этого сигнал, пропорциональный току утечки фазы, выбранной коммутатором, подается на вход интегратора, соответствующего

выбранной фазе (A4—A6). По сигналу датчика состояния диодного ключа этот сигнал интегрируется от момента замыкания диодного ключа соответствующей фазы до момента его размыкания. Таким образом, на выходе интегратора формируется сигнал, пропорциональный среднему значению тока утечки одной фазы. Это значение хранится интегратором в течение установленного интервала времени. Средние значения токов утечки других фаз определяются аналогично с помощью других интеграторов и датчиков состояния диодных ключей. Информация о том, какой из диодных ключей открыт в данный момент и ток утечки какой из фаз протекает по ограничительному сопротивлению, передается в блок определения места повреждения непосредственно из коммутатора от датчиков TAI, TA2, TA3. Возможно получение этой информации и косвенным путем по известным значениям моментов переключения диодных ключей и ЭДС сети.

В конце каждого интервала времени, соответствующего периоду ЭДС сети, средние значения токов утечки фаз из интеграторов сравниваются между собой амплитудным селектором (AC). Выбираются наибольшие и наименьшие из них. Если два из них равны между собой и больше третьего, то считается, что повреждение произошло в обмотке генератора (соединение звездой). Если одно из значений больше двух других, то считается, что повреждение — в обмотке трансформатора (соединение треугольником). Определяется фаза, в которой средний ток утечки имеет наименьшее значение, и делается заключение о том, что повреждена эта фаза. Формируется информирующий сигнал. Если средние значения токов утечки всех фаз равны, то делается заключение, что повреждение произошло в нейтрали обмотки, и формируется соответствующий сигнал.

С помощью делителя A7 вычисляется отношение наименьшего из средних значений токов утечки фаз к среднему значению тока утечки за период ЭДС сети. Численное значение полученного отношения (с учетом постоянного множителя при повреждении в обмотке трансформатора) передается в исполнительный блок и выводится на индикатор как сигнал, информирующий об удаленности места повреждения от фазного вывода обмотки.

Ограничительное сопротивление R_o выбирается с учетом предельных возможностей диодов, используемых в коммутаторе, и условий безопасности. Для сети 6–10 кВ оно должно иметь значение 2–8 МОм.

Применение рассмотренного способа связано с ограничениями. При его использовании на-

рушается симметрия защищаемой трехфазной сети относительно земли, так как всегда (в любой момент) какая-либо из фаз сети соединена с землей через ограничительное сопротивление. В результате этого появляется постоянное напряжение смещения между нейтралью сети и землей. Значение этого напряжения смещения зависит от эквивалентного сопротивления изоляции сети относительно земли R_u и ограничительного сопротивления R_o :

$$U_{No} = U_{cp} R_u / (R_u + R_o) = \frac{3\sqrt{3} E_m}{2\pi} \frac{R_u}{(R_u + R_o)}.$$

При исправной изоляции, когда $R_o \ll R_u$, напряжение смещения может достигать значения $U_{No} = \frac{3\sqrt{3} E_m}{2\pi} = 0,83 E_m$.

Постоянное напряжение смещения нейтрали вызывает повышение напряжения фазных проводников сети относительно земли, поэтому для ряда случаев может оказаться более целесообразным использование другого способа, суть которого состоит в использовании коммутатора с шестью диодными ключами (рис. 5).

С помощью этого коммутатора одновременно выбираются фазы с наибольшим и наименьшим напряжением относительно земли и соединяются с землей через отдельные ограничительные сопротивления. Измеряется сумма токов утечки на землю в этих сопротивлениях и фазные напряжения сети. По отношению этих величин определяется сопротивление изоляции сети относительно земли, которое сравнивается с допустимым значением, и, если оно оказывается меньше допустимого, формируется сигнал на отключение защищаемой сети. Измеряются параметры, характеризующие форму сигнала, пропорционального разности токов в ограничительных сопротивлениях, и по ним определяется ме-

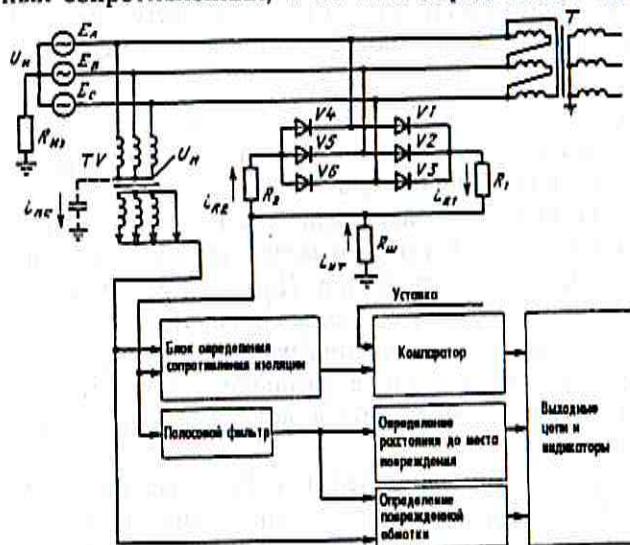


Рис. 5

сто повреждения изоляции.

Напряжение смещения нейтральной точки сети в нормальных условиях (когда сопротивление изоляции много больше ограничительного сопротивления) определяется разностью первого R_1 и второго R_2 ограничительных сопротивлений и эквивалентным сопротивлением изоляции сети относительно земли $R_{\text{ш}}$:

$$U_N = \frac{3E_m}{\pi} \frac{R_1 - R_2}{(R_1 + R_{\text{ш}})(R_2 + R_{\text{ш}})}.$$

Приемлемое смещение нейтральной точки обеспечивается путем подбора ограничительных сопротивлений. Причем, чем меньше различаются значения ограничительных сопротивлений, тем меньше напряжение смещения нейтральной точки. В предельном случае, когда $R_1=R_2$, это смещение равно нулю. Но при этом теряется важнейшее свойство метода — возможность контролировать сопротивление изоляции в симметричной относительно земли сети, поэтому сопротивления R_1 и R_2 не должны быть равными.

Задачи измерения эквивалентного сопротивления изоляции и определения места повреждения в этом устройстве решены другим способом — на основе гармонического анализа тока утечки.

В нормальных условиях, когда эквивалентное сопротивление изоляции сети относительно земли много больше сопротивлений R_1 и R_2 , по диодным ключам и ограничительным резисторам R_1 и R_2 протекают, соответственно, токи i_{R1} и i_{R2} , которые определяются, практически, ЭДС сети и сопротивлениями R_1 и R_2 . Тогда можно принять $i_{R1}=i_{R2}=i_R$. Период колебаний этого тока i_R составляет $1/6$ периода ЭДС сети, т.е. $\pi/3$ (рис. 6).

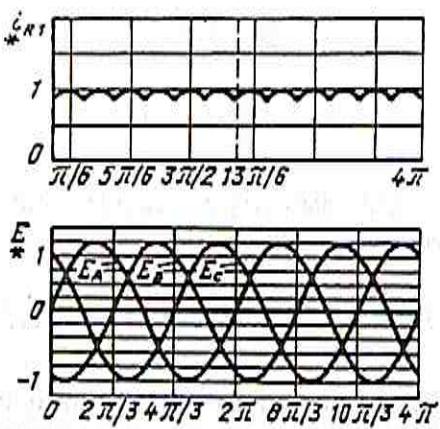


Рис. 6

Представляя ток рядом Фурье, имеем:

$$i_R(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos 2\pi k \frac{t}{T} + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin 2\pi k \frac{t}{T},$$

где k — целое число; $I_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i_R(t) dt$ — среднее значение тока за период (постоянная составляющая); $a_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i_R(t) \cos 2\pi k \frac{t}{T} dt$; $b_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i_R(t) \times \sin 2\pi k \frac{t}{T} dt$ — коэффициенты ряда.

Начальная фаза колебаний в рассматриваемых условиях при исправной изоляции не имеет значения. Поэтому за начало отсчета по оси абсцисс удобно принять точку, относительно которой функция, выражающая ток, симметрична. Тогда все синусоидальные члены ряда равны нулю и ток можно представить в виде косинусного ряда:

$$i_R = \frac{3E_m}{\pi R_s} \left(1 + \frac{2}{35} \cos 6\omega t - \frac{2}{143} \cos 12\omega t + \frac{2}{323} \cos 18\omega t + \dots \right).$$

Здесь $R_s=R_1+R_2$ — эквивалентное сопротивление для тока i_R при $R_{\text{ш}} \rightarrow \infty$.

Как видно, в этих условиях наибольшую амплитуду имеет гармоническая составляющая тока с частотой, превышающей частоту ЭДС сети в 6 раз.

При симметричном снижении сопротивления изоляции во всех фазах, когда эквивалентное сопротивление изоляции сети относительно земли соизмеримо с сопротивлением R_1 или при наличии значительной емкости проводников сети относительно земли появляются дополнительные составляющие токов в резисторах R_1 и R_2 . Эти составляющие протекают в двух контурах. Первый из них образован диодными ключами $V1-V3$, ограничительным сопротивлением R_1 , шунтом $R_{\text{ш}}$, источниками ЭДС сети и сопротивлением изоляции сети относительно земли. Второй контур образован диодными ключами $V4-V6$, ограничительным сопротивлением R_2 , шунтом, источниками ЭДС сети и сопротивлением изоляции сети относительно земли. Период колебаний токов в ограничительных сопротивлениях составляет $1/3$ периода ЭДС сети (см. рис. 3, а).

Приняв допущения, используемые для предыдущего режима, ток утечки (протекающий по шунту) можно представить в этих условиях в виде разности (с учетом направлений токов в шунте) двух косинусных рядов Фурье. Постоянная составляющая тока утечки (среднее значение) в этих условиях определяется так:

$$I_{\text{ут.с}} = \frac{3\sqrt{3}E_m(R_1 - R_2)}{2\pi(R_1 + R_n)(R_2 + R_n)}.$$

Изменение сопротивления изоляции сети относительно земли, как видно, вызывает изменение среднего значения тока утечки. Замыкание на землю в нейтральной точке обмотки представляет собой предельный случай симметричного режима при $R_n = 0$. Следовательно, интегральное (среднее) значение тока можно использовать в качестве информационного параметра при определении сопротивления изоляции.

Для определения места повреждения необходимо выделить первую гармоническую составляющую тока утечки. При замыкании на землю в обмотке генератора он может быть представлен разными непрерывными функциями на отдельных временных интервалах в пределах периода колебаний. Например, ток в первом ограничительном сопротивлении при повреждении в обмотке фазы С можно записать следующим образом (см. рис. 2, а):

$$i_{R1} = \begin{cases} i_1(\omega t) & \text{при } 0 \leq \omega t < \pi/6; \\ i_2(\omega t) & \text{при } \pi/6 \leq \omega t < 5\pi/6; \\ i_3(\omega t) & \text{при } 5\pi/6 \leq \omega t < 3\pi/2; \\ i_4(\omega t) & \text{при } 3\pi/2 \leq \omega t < 2\pi; \end{cases}$$

Здесь

$$i_1(\omega t) = \frac{E_m \alpha}{R_3} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right);$$

$$i_2(\omega t) = \frac{E_m}{R_3} \left[\sin(\omega t) - (1 - \alpha) \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \right];$$

$$i_3(\omega t) = \frac{E_m}{R_3} \left[\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) - (1 - \alpha) \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \right];$$

$$i_4(\omega t) = \frac{E_m \alpha}{R_3} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right).$$

Среднее за период значение тока утечки

$$I_{\text{cp}} = I_{\text{cp1}} + I_{\text{cp2}} + I_{\text{cp3}} + I_{\text{cp4}} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi R_3} E_m,$$

где

$$I_{\text{cp1}} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{\pi}{6}} i_1(\omega t) d\omega t = \frac{E_m}{4R_3} \alpha \frac{\sqrt{3} - 1}{\pi};$$

$$I_{\text{cp2}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} i_2(\omega t) d\omega t = \frac{\sqrt{3}}{4R_3} E_m \frac{3 - \alpha}{\pi};$$

$$I_{\text{cp3}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{5\pi}{6}}^{\frac{3\pi}{2}} i_3(\omega t) d\omega t = \frac{\sqrt{3}}{4R_3} E_m \frac{3 - \alpha}{\pi};$$

$$I_{\text{cp4}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{3\pi}{2}}^{2\pi} i_4(\omega t) d\omega t = \frac{E_m}{4R_3} \alpha \frac{1 + \sqrt{3}}{\pi};$$

$T = 2\pi$ — период тока утечки при повреждении в обмотке.

Составляющая тока утечки первой гармоники представляет собой косинусоидальную функцию с периодом T :

$$i_{R1(1)} = I_{m1} \cos(\omega t - \varphi_1),$$

амплитуда I_{m1} и начальный фазовый сдвиг φ_1 которой определяются коэффициентами для первой гармоники:

$$a_1 = \frac{2}{T} \int_0^T i_{R1}(\omega t) \cos 2\pi \frac{t}{T} dt;$$

$$b_1 = \frac{2}{T} \int_0^T i_{R1}(\omega t) \sin 2\pi \frac{t}{T} dt.$$

Каждый из этих интегралов можно определить как сумму четырех определенных интегралов пределы интегрирования в которых соответствуют границам отдельных участков, на которых ток представлен непрерывными гармоническими функциями.

В результате интегрирования получим:

$$a_1 = \frac{E_m}{2R_3} \sqrt{3} (\alpha - 1);$$

$$b_1 = \frac{-E_m}{2R_3} (\alpha - 1).$$

Тогда для амплитуды составляющей ток i_{R1} первой гармоники будем иметь:

$$I_{m1} = \sqrt{(a_1)^2 + (b_1)^2} = \frac{E_m}{R_3} (\alpha - 1).$$

Как видно, амплитуда первой гармоники ток i_{R1} зависит от удаленности места повреждения от фазных выводов обмотки. Причем, она максимальна по абсолютному значению при замыкании фазы на землю и минимальна (равна нулю) при замыкании на землю нейтрали обмотки.

Начальный фазовый сдвиг составляющей ток

первой гармоники $\varphi_1 = \arctg(b_1/a_1)$.

При повреждении в фазе С начальный фазовый сдвиг равен $-\pi/6$, при повреждении в фазе А $\pi/2$, при повреждении в фазе В $7\pi/6$.

Ток i_{R2} во втором ограничительном сопротивлении, ток утечки, протекающий по шунту i_{yT} и параметры их первых гармонических составляющих определяются с использованием аналогичного подхода.

Начальный фазовый сдвиг первой гармонической составляющей тока утечки i_{yT} , протекающего по шунту, при замыкании в обмотке, соединенной в звезду, зависит только от того, в какой фазе произошло повреждение. Так, при измерении относительно фазы А он равен π (180°) при повреждении в катушке фазы А, $5\pi/3$ (300°) — при повреждении в катушке фазы В и $\pi/3$ (60°) — при повреждении в катушке фазы С.

На рис. 7, а показаны сигналы при повреждении в обмотке генератора, соединенной звездой, а на рис. 7, б — при повреждении в обмотке трансформатора, соединенной треугольником.

Параметры первой гармонической составляющей тока утечки при повреждении в обмотке трансформатора, соединенной треугольником, имеют свои особенности. Начальный фазовый сдвиг зависит не только от того, в какой фазе произошло повреждение, но и от удаленности места повреждения от фазного вывода:

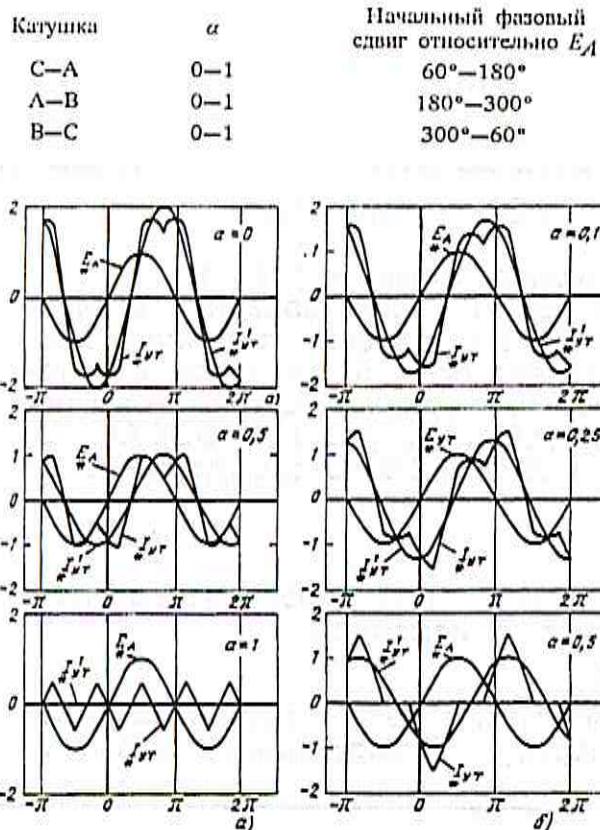


Рис. 7

Амплитуда имеет наименьшее, но не равное нулю значение при $\alpha=0.5$, а наибольшее — при $\alpha=0$ и $\alpha=1$, что соответствует замыканию на землю первого или второго выводов катушки.

Таким образом, по амплитудам (или связанным с ними интегральным значениям) и начальными фазовыми сдвигами первых гармонических составляющих тока в ограничительных сопротивлениях или в шунте можно оценить сопротивление изоляции сети относительно земли, выявить поврежденный элемент сети и определить место возникновения повреждения.

Действия по определению сопротивления изоляции и места повреждения, предусмотренные предлагаемым способом, реализуются в измерительной части устройства следующим образом.

В блоке определения сопротивления изоляции формируются интегральные значения сигналов, пропорциональные ЭДС сети и току утечки, и по ним вычисляется значение сопротивления изоляции контролируемой сети.

С помощью компаратора это значение сравнивают с уставкой. Если сопротивление изоляции становится меньше допустимого, то формируют соответствующие предупредительный, управляющий и информационный сигналы.

Первую гармоническую составляющую тока утечки выделяют с помощью полосового фильтра, который на частоте ЭДС сети имеет определенный максимальный коэффициент передачи (например, равный единице) и не изменяет фазовый сдвиг сигнала.

В блоках определения поврежденной обмотки и расстояния до места повреждения анализируются параметры первой гармонической составляющей тока утечки и по ним определяют поврежденный элемент сети и место повреждения.

Необходимо отметить, что применение рассмотренных методов требует изменения общепринятой схемы включения ТН. Для нормальной работы устройства следует исключить все искусственно созданные цепи утечки на землю, кроме тех, которые образованы устройством. В частности, нейтраль первичных обмоток ТН должна быть отсоединенна от земли. Это влечет за собой вывод из работы традиционной защиты генератора от однофазных замыканий на землю по напряжению нулевой последовательности [1], необходимость в которой отпадает в связи с вводом в работу нового устройства.

Вместе с тем, изменение схемы включения ТН существенно улучшает условия работы этого ТН. Действительно, при однофазном замыкании на землю и традиционной схеме включения ТН две фазные первичные обмотки его оказываются подключенными на линейные напряжения, что, как правило, вызывает повышение тока намаг-

ничивания и насыщение магнитопровода. В этом случае неизбежно создаются благоприятные условия для возникновения феррорезонансных колебаний в контурах, образованных нелинейными индуктивностями TH и емкостями фаз относительно земли, которые часто являются причинами повреждения TH [1, 2].

Использование TH без заземления нейтрали первичной обмотки смягчает режимы работы трехфазного TH в экстремальных условиях и снижает вероятность выхода из строя при однофазных замыканиях. Кроме того, можно отказаться от трехфазных трансформаторов типа НТМИ и для цепей, не связанных с защитой от однофазных замыканий на землю, использовать на генераторном напряжении однофазные TH , включенные по схеме неполного треугольника.

В случаях, когда заземление нейтрали TH все же необходимо, возможно использование другого варианта схемы включения трехфазного TH с заземлением нейтрали первичной обмотки через конденсатор (на рис. 4 и 5 — штрих), емкость которого должна выбираться по условиям получения приемлемой точности работы защиты по напряжению нулевой последовательности, для исключения феррорезонансных явлений и составлять несколько десятков микрофарад [3]. При этом варианте схемы включения TH возможна совместная работа предлагаемого устройства и традиционной защиты по напряжению нулевой последовательности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вавин В.Н. Релейная защита блоком турбогенератор—трансформатор. — М.: Энергоиздат, 1982.
2. Вавин В.Н. Трансформаторы напряжения и их вторичные цепи. — М.: Энергия, 1977.
3. Бархатов Г.В., Быков В.М., Леонов И.И., Надеждин В.В. Устройство защиты блочного генератора — Электротехника 1978, № 3.

[24.09.98]

Авторы: Булычев Александр Витальевич окончил электроэнергетический факультет Вологодского политехнического института в 1980 г. Защитил кандидатскую диссертацию на тему «Разработка и исследование отдельных узлов комплексной защиты генератора» в 1984 г. в Ленинградском политехническом институте (ЛПИ). Докторант кафедры «Электрические станции и автоматизация энергетических систем» С.Петербургского государственного технического университета (СПбГТУ).

Ванин Валерий Кузьмич окончил энергетический факультет Ташкентского политехнического института в 1961 г. Защитил докторскую диссертацию на тему «Релейная защита на элементах вычислительной техники» в 1990 г. в ЛПИ. Заведующий кафедрой «Электрические станции и автоматизация энергетических систем» СПбГТУ.

К ЧИТАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «Электричество»

Бесплатно получать оглавления нашего журнала можно через электронные сети. Эту услугу оказывает служба ИНФОМАГ, организованная в Московском физико-техническом институте. Кроме оглавлений журнала «Электричество» служба ИНФОМАГ распространяет оглавления более 80 отечественных и зарубежных научно-технических журналов, а также ряд научных электронных бюллетеней. Все материалы службы ИНФОМАГ доступны в режиме ON-LINE через сервер РосНИИРОС по следующим URL:

<http://www.ripn.net>

<gopher://gopher.ripn.net>

Для получения материалов службы ИНФОМАГ по подписке через электронную почту следует направить письмо с командой

HELP по адресу ims@ripn.net

Полная информация о службе ИНФОМАГ может быть получена в ответ на команду HELP, направленную по адресу infomag@lgrant.mipt.msk.su