

Тентиев Р.Б

ИСТОЧНИК КОНТРОЛЬНОГО ТОКА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ЕМКОСТНОГО ТОКА

R.B.Tentiev

SOURCE CONTROL CURRENT TO PROTECT THE EARTH FAULT IN THE ELECTRICAL CAPACITANCE CURRENT COMPENSATION

УДК 621.316.9.01

В работе рассматривается способ выполнения селективной защиты от замыканий на землю в обмотке статора генератора. Для выполнения защиты используется наложение через дугогасящий реактор контрольного тока с частотой 25 Гц, отбираемый от источника контрольного тока.

In this work the technique of selective ground fault protection in the winding of generator's. For implementation of this protection the imposition through ground-fault neutralizer of the controlling current with the frequency of 25 Hz is used.

Проблемы выполнения избирательной защиты от замыканий на землю в электроустановках с компенсацией емкостного тока, обусловленные тем, что электрические величины промышленной частоты не несут в себе информацию, позволяющую выявить поврежденный элемент.

Идея наложения на первичные цепи электроустановки вспомогательного (контрольного) тока для обеспечения действия защиты, в общем, является вполне очевидной и для ее возможной реализации известен ряд предложений [1, 2]. Однако практически реализованы далеко не все из известных предложений это объясняется, в том числе и тем, что при использовании метода наложения контрольного тока должны выполняться определенные требования. Основное из них заключается в том, что частота и схема подключения источника контрольного тока должны быть выбраны так, чтобы были совместимы условия работы защиты при устойчивых и перемежающихся дуговых замыканиях на землю.

При перемежающихся замыканиях в электроустановках с компенсацией емкостного тока после каждого очередного погасания дуги время восстановления напряжения до следующего пробоя изоляции зависит от расстройки компенсации, пробивного напряжения и условий горения дуги и, ориентировочно, лежит в пределах от 0,3 до 0,1 с. В соответствии с этим частотный спектр токов и напряжений нулевой последовательности содержит низкочастотные составляющие с частотой примерно от 3 до 10 Гц и кратные им гармоники.

В качестве примера на рис. 1 приведены расчетные осциллограммы тока в поврежденной линии и напряжения нулевой последовательности при перемежающемся замыкании, когда дуга гаснет после каждого очередного пробоя при переходе через ноль

высокочастотной составляющей переходного емкостного тока.

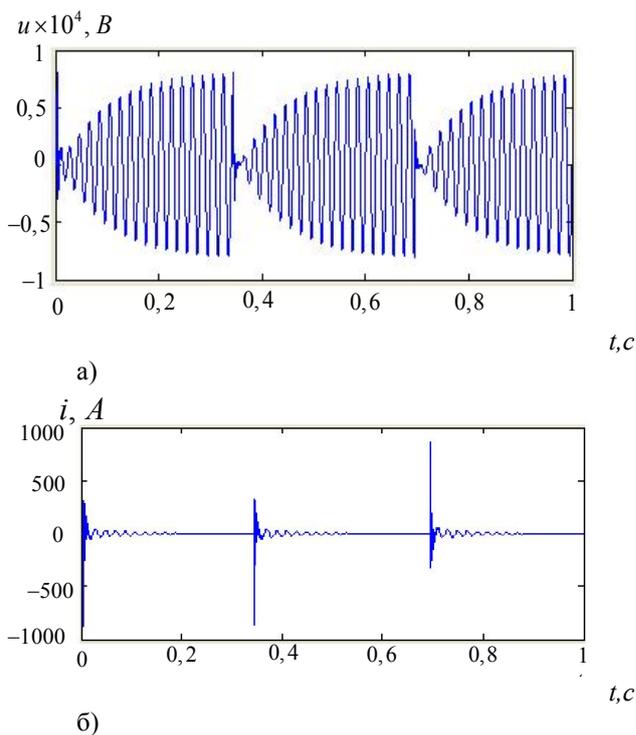


Рис. 1. Расчетные осциллограммы: а – напряжения нулевой последовательности при перемежающемся замыкании; б – ток в поврежденной линии

Распределение составляющих токов различных частот при перемежающемся замыкании по элементам сети можно рассмотреть на схеме замещения, в которой в месте замыкания включено напряжение нулевой последовательности, содержащее, в общем случае, сумму гармонических составляющих (рис. 2).

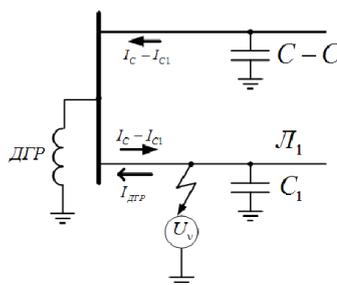


Рис. 2. Схема замещения нулевой последовательности сети с компенсацией емкостного тока

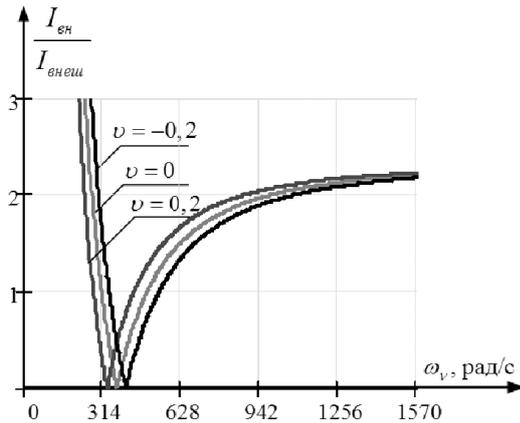


Рис. 3. Зависимость отношений токов при внутреннем и внешнем замыкании от  $\omega_v$

Составляющая тока с частотой  $\omega_v$  в месте установки защиты на линии Л1 соответственно при замыкании на этой линии и при внешнем замыкании равны

$$I_{вн\nu} = U_v \left[ \frac{1}{\omega_v L} - \omega_v (C - C_1) \right],$$

$$I_{внеш\nu} = U_v [\omega_v C_1],$$

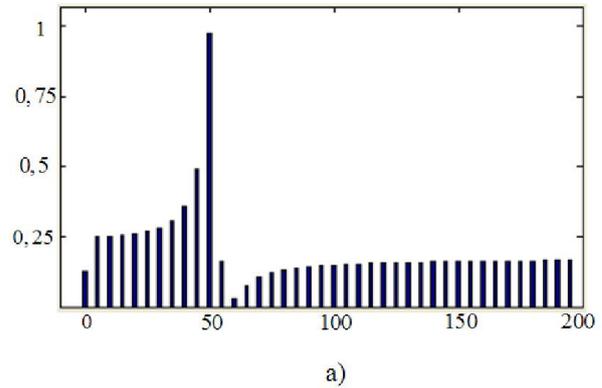
где  $U_v$  – действующее значение гармоники частоты  $\omega_v$  в напряжении нулевой последовательности;  $L$  – индуктивность дугогасящего реактора;  $C, C_1$  – соответственно суммарная емкость трех фаз всей сети и линии Л1.

Отношение модулей токов  $I_{вн\nu}$  к  $I_{внеш\nu}$  после несложных преобразований и введения расстройки компенсации  $\nu = 1 - \frac{1}{\omega_{\Pi}^2 LC}$ , где  $\omega_{\Pi}$  – промышленная частота, определяется как

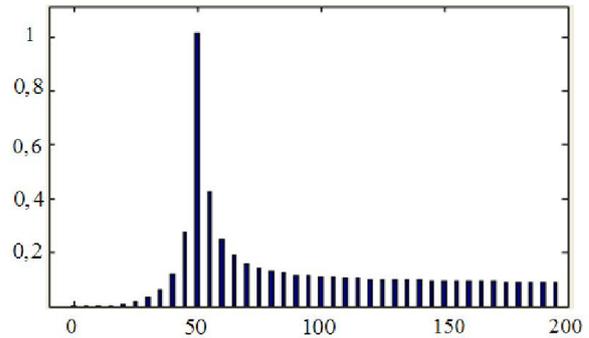
$$\frac{I_{вн}}{I_{внеш}} = \left| 1 - \frac{C}{C_1} \left[ 1 - \frac{\omega_{\Pi}^2}{\omega_v^2} (1 - \nu) \right] \right|. \quad (1)$$

На рис.3 приведена зависимость отношений токов по (1) от  $\omega_v$ , построенная для случая, когда емкость защищаемой линии составляет 30% от емкости всей сети и в диапазоне расстроек компенсации  $\nu = \pm 20\%$ .

Как видно, при использовании токов в области частот ниже промышленной условия для выполнения защиты значительно лучше, чем при использовании высших гармоник. Это обстоятельство иллюстрируется также расчетными амплитудно-частотными спектрами, при тех же условиях, при которых получены осциллограммы, приведенные на рис. 4.



а)



б)

Рис. 4. Расчетные амплитудно-частотные спектры тока: а – при внутреннем замыкании; б – при внешнем замыкании

По спектрам четко видно, что амплитуды низкочастотных гармоник тока в поврежденной линии значительно больше, чем в неповрежденной. В то время как в области высоких частот соотношение амплитуд гармоник соответствует только лишь соотношению значений емкостей линии и сети. Это объясняется тем, что токи низкочастотных гармоник замыкаются в основном через дугогасящий реактор, имеющий в этой области частот низкое сопротивление.

Из изложенного следует, что условия работы защиты при перемежающихся и устойчивых замыканиях будут совместимы, если частота контрольного тока будет ниже промышленной. На этом основании частота контрольного тока принята равной 25 Гц. Такое значение частоты является целесообразным также в связи с тем, что в качестве основного элемента источника контрольного тока (ИКТ) оказалось возможным использовать известное статическое устройство – электромагнитный параметрический делитель частоты на два [3].

Источник контрольного тока включается последовательно в цепь дугогасящего реактора со стороны заземления. При наличии в сети нескольких дугогасящих реакторов (ДГР) их заземляемые выводы объединяются и присоединяются к контуру заземления через источник контрольного тока (рис. 5).

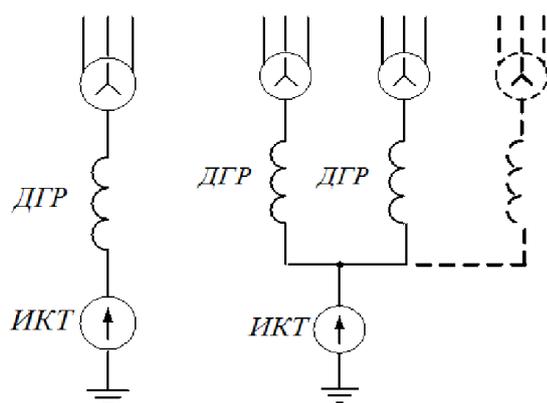


Рис. 5. Схема подключения источника контрольного тока

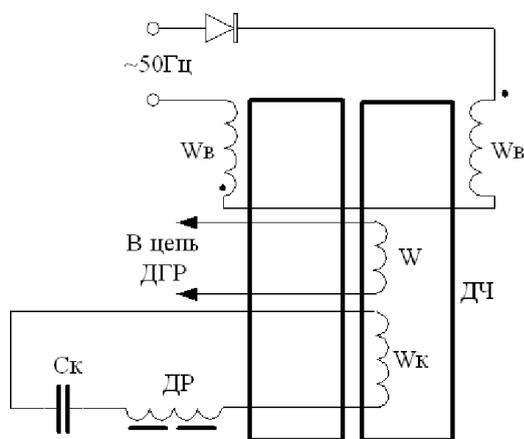


Рис. 6. Источник контрольного тока

При принятой схеме включения источник контрольного тока должен также удовлетворять еще двум требованиям:

- включение источника контрольного тока не должно нарушать функционирования дугогасящего реактора;
- работа источника контрольного тока не должна нарушаться при замыкании на землю, когда по его выходным цепям протекает ток дугогасящего реактора.

Оба указанных требования выполняются путем замены в классической схеме параметрического делителя частоты конденсатора цепью из последовательно соединенных конденсатора и линейного дросселя [4]. Принципиальная схема источника контрольного тока приведена на рис.6.

Основой источника контрольного тока является электромагнитный параметрический делитель частоты, впервые предложенный в [3].

Электромагнитная часть делителя частоты выполнена на двух одинаковых замкнутых О-образ-

ных магнитопроводах, у которых боковые стержни конструктивно совмещены. На магнитопроводах делителя частоты нанесены следующие обмотки: обмотка колебательного контура ( $W_k$ ), выходная ( $W$ ) и обмотка возбуждения ( $W_b$ ), в цепь последней включен диод. На обмотку возбуждения подается напряжение питания источника контрольного тока – 220 В, 50 Гц.

Параметры цепи конденсатор – линейный дроссель подбираются таким образом, чтобы на частоте 25 Гц ее эквивалентное емкостное сопротивление соответствовало условиям деления частоты на два, а при частоте 50 Гц имело место условие точного резонанса. Поэтому относительно зажимов выходной обмотки на частоте 50 Гц источник контрольного тока представляет собой трансформатор, у которого вторичная обмотка практически замкнута накоротко.

Таким образом, во-первых, сопротивление источника контрольного тока относительно зажимов выходной обмотки на частоте 50 Гц весьма мало – составляет доли процента от сопротивления дугогасящего реактора. Во-вторых, ток дугогасящего реактора замыкается в основном по линейной цепи дроссель-конденсатор, а его намагничивающая часть мала, благодаря чему значительно ослабляется влияние тока дугогасящего реактора на электромагнитный режим делителя частоты.

Линейный дроссель (ДР) выполнен на броневом III – образном магнитопроводе, в среднем стержне которого имеется немагнитный зазор. Настройка дросселя изменением длины немагнитного зазора осуществляется однократно при изготовлении источника. Электромагнитная часть делителя частоты и дроссель помещаются в баки с маслом.

Источники контрольного тока сохраняют свою работоспособность по условию существования режима деления частоты на два и по условию допустимых электромагнитных нагрузок, если намагничивающая сила, создаваемая током реактора, проходящим по выходной обмотке при замыкании на землю, не превысит некоторого предельного значения. Так как напряжение половинной частоты на выходной обмотке пропорционально ее числу витков, то при прочих равных условиях указанная намагничивающая сила пропорциональна произведению напряжения выходной обмотки с частотой 25 Гц на суммарный ток дугогасящего реактора. Для применяемых в настоящее время источников контрольного тока, рассчитанных на длительную работу при замыкании в сети, предельное значение этой величины составляет 2200 ВА.

Для сетей с различными номинальными напряжениями и емкостными токами замыкания источники контрольного тока отличаются друг от друга только числом витков и площадью поперечного сечения провода выходной обмотки. При этом

напряжение с частотой 25 Гц на выходной обмотке равно  $U_{25} = \frac{2200}{I_{ДГР}}$ , а контрольный ток выдаваемый

источником контрольного тока при металлическом замыкании

$$I_{25} = \frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 2200}{U_{ном}}$$

где  $U_{ии}$  – номинальное напряжение сети.

Например, для сети 10 кВ с емкостным током 100 А расчетные значения следующие:

$$U_{25} = 22В, \quad I_{25} = 0,76А.$$

Практически выходная обмотка выполняется состоящей из четырех секций, что позволяет изменять число витков и применять источник с одним исполнением выходной обмотки для сетей определенного диапазона параметров.

Источник контрольного тока, выполненный на базе элетромагнитного параметрического делителя частоты без принятия специальных мер обладает еще одним важным для данного применения свойством, а именно – он не критичен к изменению питающего напряжения в довольно широком диапазоне (примерно 200–250 В). При этом напряжение с частотой 25 Гц изменяется не более, чем на 10%.

Использование для работы защиты низкочастотных составляющих позволяет отстраиваться от тока небаланса фильтров токов нулевой последовательности по частоте. Благодаря этому выполнены

защиты от замыканий на землю в обмотке статоров генераторов, работающих на сборные шины, и генераторов укрупненных блоков на гидроэлектростанциях с использованием фильтров токов нулевой последовательности на типовых фазных трансформаторах тока.

Благодаря тому, что источник контрольного тока работает непрерывно, электрические величины с частотой 25 Гц в нормальном режиме используются для измерения расстройки компенсации и автоматической настройки дугогасящих реакторов.

В последние годы источники контрольного тока используются для обеспечения работы защиты генераторов от замыканий на землю, входящих в состав комплексной цифровой защиты, выпускаемой НПП «Экра».

#### Литература

1. Сирота И.М. Трансформаторы и фильтры напряжения для тока нулевой последовательности. Киев: Наукова думка, 1983, 266с.
2. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. Учебник для вузов. М: «Энергия», 1976, 560 с.
3. Мандельштам Л.И., Папалекси Н.Д. Собрание сочинений Мандельштама Л.И., Т. 2, М.: Изд-во АН СССР, 1947.
4. Вайнштейн Р.А. Тентиев Р.Б. Юдин С.М. Повышение надежности защиты генераторов от замыканий на землю, основанной на наложении вспомогательного тока с частотой 25 Гц. // Известия Томского политехнического университета.– 2008. - №4.-Том 312, С. 96 – 100.

Рецензент: к.т.н., профессор Сатаркулов К.А.