

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО  
ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ДЕЛИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ В КАЧЕСТВЕ  
ИСТОЧНИКА КОНТРОЛЬНОГО ТОКА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ  
ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ КОМПЕНСИРОВАННЫХ СЕТЕЙ**

Р. А. ВАЙНШТЕЙН, Л. И. ВОРОНОВА, А. В. ШМОЙЛОВ

(Представлена научным семинаром кафедры электрических станций)

В защите от замыканий на землю компенсированных сетей, основанной на наложении на сеть тока с частотой, отличающейся от частоты сети, важнейшим элементом является источник вспомогательного (контрольного) тока (ИКТ). Особые требования к этому источнику определяются главным образом тем, что при замыкании на землю в зависимости от способа включения его к нейтрали он оказывается под полным фазным напряжением сети или через него протекает полный ток дугогасящей катушки. При этом внутреннее сопротивление ИКТ к току промышленной частоты должно быть таково, чтобы сопротивление в цепи нейтрали изменялось незначительно. Такие требования к ИКТ обусловили в ряде случаев выполнение его в виде нелинейного сопротивления, включаемого в цепь нейтрали [1]. Такой источник генерирует контрольный ток повышенной частоты только при протекании по нему тока промышленной частоты, то есть при замыкании на землю точек сети, потенциал которых не равен 0. Выполненный таким образом источник принципиально влияет на величину тока нейтрали, так как источником энергии для получения контрольного тока является именно сам ток, протекающий в цепи нейтрали. К тому же коэффициент преобразования тока первой гармоники в токи высших гармоник всегда меньше единицы, то есть на нелинейном ИКТ появляется также некоторое напряжение первой гармоники при последовательном включении и ответвляется в него некоторая часть тока при параллельном включении. Этим объясняется, главным образом, заметное влияние нелинейных ИКТ на ток нейтрали. Отсутствие контрольного тока в нормальном режиме и при замыкании вблизи нейтральных точек генераторов лишает защиту с наложением на сеть контрольного тока важного преимущества — возможности осуществления 100%-ной защиты от замыканий на землю генераторов.

По-нашему мнению, защита с наложением на сеть контрольного тока будет полностью конкурентноспособна, если ИКТ будет удовлетворять следующим требованиям.

1. Напряжение источника контрольного тока должно оставаться постоянным при замыкании в любой точке электрически связанной сети.

2. Включение ИКТ в цепь дугогасящей катушки не должно приводить к заметному изменению сопротивления в цепи нейтрали к току промышленной частоты.

Использование ИКТ в энергетической установке как массового устройства требует также выполнения требования высокой надежности, простоты изготовления и настройки.

Этим требованиям в значительной степени удовлетворяет электромагнитный параметрический делитель частоты с соответствующим образом выбранными параметрами и некоторыми изменениями схемы при последовательном включении его выходной обмотки в цепь дугогасящей катушки. К тому же, как показано в [2], а также в [3], защита на частоте ниже промышленной обладает лучшими свойствами по сравнению с защитой на повышенной частоте. А при использовании ее для генераторов, работающих в блоке с трансформатором, применение повышенной частоты при последовательном включении ИКТ принципиально невозможно.

Делитель частоты в качестве ИКТ работает в особых условиях, так как при замыкании на землю в сети через него протекает полный ток дугогасящей катушки. При этом требование (1) не должно нарушаться, т. е. колебания половинной частоты должны сохраняться при протекании по выходным обмоткам делителя большого тока промышленной частоты.

Схема делителя частоты и способ его включения в цепь дугогасящей катушки показаны на рис. 1.

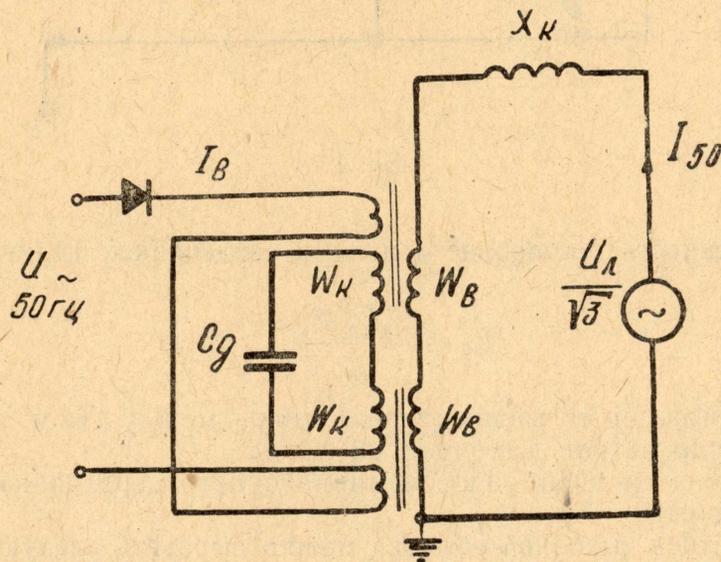


Рис. 1

Обмотка колебательного контура  $W_k$  и выходная обмотка  $W_b$  имеют между собой трансформаторную связь, а обмотка возбуждения  $W_{воз}$  предназначена для периодического изменения магнитной проницаемости материала сердечников делителя.

В связи с этим схему замещения делителя можно представить как схему замещения трансформатора, индуктивность ветви намагничивания которого меняется периодически с частотой 50 Гц (рис. 2). При замыкании на землю ток промышленной частоты  $I_{50}$  разветвляется между ветвью намагничивания  $X_n$  и сопротивлением конденсатора  $X_c$ . Эти токи обозначены  $I_n$  и  $I_c$ . В таком режиме сопротивление ветви намагничивания является функцией тока рабочей частоты и пульсирующего тока возбуждения  $I_n$ .

Процесс деления частоты сохраняется до тех пор, пока напряженность поля, создаваемая частью тока рабочей частоты, ответвляющейся

в ветвь намагничивания, не достигнет такой величины, при которой существенно не нарушется периодический закон изменения  $X_H$ .

Даже без использования специальных мер делитель может быть использован как ИКТ, благодаря тому, что ветвь намагничивания сильно шунтируется сопротивлением конденсатора  $X'_C$ , так как на частоте 50 гц  $\frac{X'_H}{X'_C} = 4$ . Соотношение сопротивлений вытекает из того, что резонансная частота контура, образованного  $X'_H$  и  $X'_C$ , близка к 25 гц.

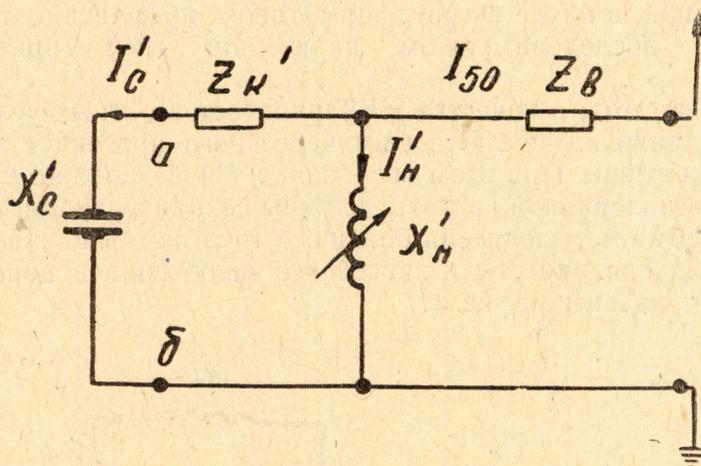


Рис. 2

Напряженность постороннего поля в сердечниках делителя частоты равна

$$H_{50} = \frac{K_p I_{50} W_B}{l_{cp}}, \quad (1)$$

где  $K_p$  — коэффициент распределения токов между  $X'_H$  и  $X'_C$ ;  
 $W_B$  — число витков выходной обмотки;  
 $l_{cp}$  — длина средней силовой линии одного сердечника делителя частоты.

Число витков выходной обмотки можно выразить следующим соотношением:

$$W_B = \frac{U}{K_1 B_{25} \cdot q}, \quad (2)$$

где  $K_1$  — коэффициент пропорциональности;  
 $B_{25}$  — индукция с частотой 25 гц, принимаемая синусоидальной;  
 $q$  — площадь поперечного сечения одного сердечника делителя частоты;  
 $U$  — напряжение с частотой 25 гц на выходной обмотке делителя, определяемое по условию создания необходимой величины контрольного тока при металлическом замыкании.

Подставив (2) в (1), получим

$$K_1 H_{50} B_{25} l_{cp} q = K_p I_{50} U. \quad (3)$$

В (3) произведение  $H_{50} \cdot B_{25} \cdot l_{cp} \cdot q$  пропорционально объему сердечников делителя частоты, т. е. его расчетной мощности [4].

$$S_p = K_2 H_{50} B_{25} l_{cp} \cdot q. \quad (4)$$

Из (3) и (4) получим

$$S_p = I_{50} U \frac{K_p}{K_3}, \quad (5)$$

где  $K_3 = K_1 \cdot K_2$ .

Формулу (5) можно выразить через величину требуемого контрольного тока и линейное напряжение сети

$$S_p = \frac{K_p}{K_3} \cdot \frac{I_T U_L}{1 \sqrt{3}}, \quad (6)$$

где  $I_T$  — требуемая величина контрольного тока, а напряжение  $U$  согласно схеме рис. 1 заменено падением напряжения на дугогасящей катушке от тока  $I_T$ .

$$U = \frac{U_L I_T}{2 \sqrt{3} I_{50}}.$$

Величина коэффициента  $K_p/K_3$  была определена путем испытания делителя частоты с расчетной мощностью 40 *ва* по схеме рис. 1. Эти испытания позволили установить, что делитель надежно работает, если  $K_p/K_3 = 0,5$ .

Из (6) видно, что мощность делителя может быть снижена благодаря уменьшению  $K_p$ .

Снижение  $K_p$  без нарушения условия резонанса на частоте 25 *гц* можно достигнуть путем замены конденсатора в делителе частоты цепью из последовательно соединенных линейной катушки индуктивности ( $L$ ) и конденсатора ( $C$ ), подобранных так, чтобы реактивное сопротивление всей внешней цепи контурной обмотки, удовлетворяло следующим условиям:

$$\text{на частоте } 50 \text{ гц } X = 0; \quad (7)$$

$$\text{на частоте } 25 \text{ гц } X = \frac{2}{\omega C_p}, \quad (8)$$

где

$$\omega = 2\pi f,$$

$$f = 50 \text{ гц},$$

$C_p$  — емкость, удовлетворяющая условию резонанса на частоте 25 *гц*.

Раскрывая (7) и (8), получим

$$\frac{\omega_0^2}{\omega^2} = 1, \quad (9)$$

$$L = \frac{4}{3} \cdot \frac{1}{\omega^2 \cdot C_p}, \quad (10)$$

где  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ .

Соотношения (9) и (10) являются расчетными для определения  $L$  и  $C$ . При этом ясно, что снижение  $K_p$  будет тем выше, чем выше добротность катушки индуктивности  $L$ .

С точки зрения влияния делителя частоты на ток дугогасящей катушки важна величина сопротивления относительно зажимов выходной обмотки. Из схемы рис. 2 его можно считать примерно равным

$$Z_p = Z_B + Z'_K + Z'_{КВН},$$

где  $Z_B$  — полное сопротивление выходной обмотки;

$Z'_K$  — полное сопротивление контурной обмотки, приведенное к числу витков выходной обмотки;

$Z'_{квн}$  — полное сопротивление внешней цепи контурной обмотки, приведенное к числу витков выходной обмотки.

Сопротивление  $Z_p$  у реальных делителей частоты, выполненных на броневых или стержневых сердечниках, значительно меньше сопротивления дугогасящей катушки, если их мощность определена по (6).

Благодаря малости  $Z_p$  включение делителя частоты в цепь дугогасящей катушки практически не изменяет тока компенсации.

Нетрудно также установить, что  $Z_p \equiv I_T^2$ , так как

$$W_B \equiv U \equiv I_T, \text{ а } Z_p \equiv W_B^2. \quad (11)$$

Из (6) и (11) следует, что мощность делителя частоты и его влияние на режим компенсации тем меньше, чем меньше  $I_T$ , т. е. чем выше чувствительность частотно-избирательных реагирующих органов.

Для проверки сказанного выше был проведен опыт со схемой по рис. 1. Использовался делитель мощностью 7 *ва* с напряжением половинной частоты на выходной обмотке 7*в*. Сопротивление  $X_k$ , иммитирующее дугогасящую катушку, равнялось 20 *ом*. При включении делителя ток  $I_{50}$  изменился незначительно. Процесс деления частоты нарушался при токе  $I_{50} = 2a$ . При включении вместо конденсатора  $C$  цепи  $L-C$  с параметрами, определенными по (16) и (17), процесс деления частоты сохранялся при токе  $I_{50} = 18 \div 20 a$ . Составляющая напряжения половинной частоты при этом практически не изменялась. То есть теперь величина коэффициента  $K_p K_z$  может быть снижена до  $0,05 \div 0,06$ .

При замене конденсатора цепью  $L-C$  влияние делителя на ток дугогасящей катушки становится во много раз меньше, так как в этом случае реакция делителя к току 50 *гц* аналогична реакции трансформатора, вторичная обмотка которого замкнута накоротко.

Для иллюстрации приведем соответствующие параметры делителей частоты, установленных в компенсированной сети на 6 кв. Барнаульской ТЭЦ-2 с целью осуществления защиты от замыканий на землю кабельной сети.

Два делителя, включенные в цепи двух дугогасящих катушек, настроенных каждая на 60 *а*, обеспечивают контрольный ток 1,2 *а*.

Расчетная мощность делителей определялась без учета цепи  $L-C$  и равна 600 *ва*. Число витков контурной обмотки равно 1000, а выходной — 15. Емкость, обеспечивающая резонанс на частоте 25 *гц*, равна 7 *мкф*. Приведенное к числу витков выходной обмотки сопротивление конденсатора на частоте 50 *гц*  $X_c = 0,1 \text{ ом}$ .

Полное сопротивление короткого замыкания между контурной и выходной обмотками, приведенное к числу витков выходной обмотки,  $Z'_{кз} = 2,25 \cdot 10^{-1} \text{ ом}$ . Сопротивление дугогасящих катушек во много раз больше этих сопротивлений (на частоте 50 *гц* — 60 *ом*). При замене конденсатора цепью  $L-C$  сопротивление делителя становится еще меньше, так как в цепи контурной обмотки на частоте 50 *гц* воспринимается только активное сопротивление, которое, будучи приведенным к числу витков выходной обмотки, равно  $2,7 \cdot 10^{-3} \text{ ом}$ .

Наблюдение за работой делителей проводилось при искусственных замыканиях на землю в упомянутой сети. Изменения тока дугогасящей катушки от включения делителей, измеряемого амперметром с классом точности 0,2, естественно, замечено не было.

Напряжение половинной частоты на выходной обмотке также не изменилось ни по величине, ни по фазе.

Делители находятся в опытной эксплуатации в течение одного года. За это время в сети было около 10 замыканий на землю. Нарушения в работе делителей замечено не было.

### Выводы

1. При осуществлении защиты от устойчивых замыканий на землю компенсированных сетей путем наложения на сеть тока с частотой 25 гц возможно использование параметрического делителя частоты в качестве источника этого тока, включенного выходной обмоткой непосредственно в цепь дугогасящей катушки.

2. Влияние делителя частоты на сопротивление цепи нейтрали при определении его расчетной мощности по (6) незначительно.

3. Достигается существенное снижение расчетной мощности делителя и его влияния на сопротивление цепи нейтрали при замене конденсатора колебательного контура цепью  $L-C$  с параметрами, выбранными по (9) и (10).

4. Полученные выводы хорошо подтверждаются опытами, проведенными в лаборатории и в промышленных условиях.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Сигнализация замыканий на землю в компенсированных сетях. Сборник статей под редакцией инженера В. И. Иоэльсона. Госэнергоиздат, 1962.

2. Р. А. Вайнштейн. Некоторые вопросы создания сигнализации замыканий на землю в компенсированных сетях, осуществляемой наложением на сеть тока с частотой, отличающейся от частоты сети. Сборник докладов к научно-технической конференции по обобщению опыта проектирования и строительства линий электропередачи и подстанций. Новосибирск, 1964.

3. Р. А. Вайнштейн, А. В. Шмойлов. О стопроцентной защите синхронных генераторов от замыканий на землю. В настоящем сборнике.

4. К. Г. Митюшкин. Магнитный делитель частоты. «Электричество», № 8, 1957.