

**В.Ф.БЕЗОТОСНЫЙ**, канд.техн.наук;  
**В.В.КОЗЛОВ**, канд.техн.наук; ЗНТУ, Запорожье

## **СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ ЗАМЫКАНИЯ В СЕТЯХ 6-10 КВ С ДУГОГАСЯЩИМ РЕАКТОРОМ**

У роботі описана розроблена швидкодіюча система компенсації ємнісних струмів замикання на землю в мережах 6-10 кВ із дугогасящим керованим реактором. Розглянуто процеси при фазоімпульсному регулюванні струму компенсації, запропонована методика вибору силової регульованої індуктивності - дугогасящего реактора, ємнісного фільтра й силових тиристорів. Наведено практичну блок-схему системи регулювання.

The developed fast-acting system of the compensation of ground fault capacitive currents in 6-10 kV circuits with quenching controlled reactor is described in this work. The processes under phase pulse regulation of a compensation current are considered, the method of selection of the power regulated inductance, that is of the quenching reactor, a capacitive filter and power thyristors are proposed. The practical block-scheme of regulation system is adduced here.

**Постановка проблемы.** Преобладающим видом повреждений в электрических сетях напряжением 6...10 кВ являются однофазные замыкания на землю. Они составляют не менее 75 % от общего числа повреждений [1]. Длительная работа сетей с однофазным замыканием на землю может привести к повреждению изоляции различного оборудования, в особенности трансформаторов напряжения и высоковольтных двигателей, к перерастанию однофазного замыкания в многофазное, то есть к аварийному отключению потребителей. В воздушных электрических сетях это может привести к разрушению железобетонных опор [2].

**Анализ публикаций.** ПУЭ допускает работу сетей с изолированной нейтралью без компенсации притока замыкания на землю, не превышающих 30 А при напряжении 6 кВ и 20 А при напряжении 10 кВ, однако опыт эксплуатации показывает, что повреждения имеют место и при меньших значениях токов. В связи с этим ведутся многочисленные работы с целью оптимизации режимов этих сетей. Из множества направлений в этой области можно выделить следующие: наложение активного тока на емкостной, резонансная и диссонансная компенсация емкостного тока со ступенчатой и плавной регулировкой тока компенсации и другие [1-5].

Большое количество рекомендаций затрудняет выбор оптимального режима работы нейтрали конкретной электрической сети. Как следствие этого, часто принимают экономически необоснованные решения, такие как перевод всех сетей 6...10 кВ на режим работы с резонансной настройкой компенсации, применение автоматических регуляторов токов компенсации и т.п.

**Целью** настоящей работы на основании вышеизложенного является выработка технически обоснованных рекомендаций по выбору режима работы нейтрали сетей 6...10 кВ.

В качестве критерия предлагается принять следующие требования:

- режим нейтрали сети должен исключить возможность возникновения феррорезонансных процессов и значительных резонансных смещений в нейтрали в нормальном режиме работы;
- максимальная величина полного тока замыкания на землю для нерегулируемых дугогасящих реакторов (ДРГ) не должна превышать 10 А;
- автоматические регуляторы в нормальном режиме должны обеспечивать работу с расстройкой компенсации не выше 5 %, а в режиме замыкания на землю не более 10 А. При невозможности выполнить это требование должны применяться всережимные регуляторы;
- при токе превышающем 5 А и переменной конфигурации сети - применять дугогасящие регуляторы с автоматическим регулятором.

Тип автоматического регулятора следует выбирать исходя из следующих условий. Если при предварительно настроенном ДГР, после возникновения замыкания на землю и в результате переключений в сети, полный ток замыкания на землю не превысит 10 А, достаточно использовать автоматический регулятор настройки ДГР в нормальном режиме. В противном случае необходимо устанавливать автоматический регулятор настройки ДГР, работающий как в нормальном режиме, так и при замыкании на землю. В электрических сетях с токами замыкания превышающими 40 А целесообразно применять быстродействующую систему компенсации емкостных токов.

Осуществление автоматических систем компенсации емкостных токов (АСКЕТ) невозможно без наличия дугогасящих реакторов, конструкция которых позволяет регулировать величину тока компенсации. Выпускаемые в настоящее время и описанные в технической литературе ДГР имеют ряд недостатков, затрудняющих разработку АСКЕТ. Дугогасящие реакторы плунжерного типа, позволяющие плавно регулировать ток компенсации, не обладают требуемым быстродействием (время настройки достигает десятков секунд). ДГР с подмагничиванием постоянным током сложны в изготовлении и требуют большого расхода электроэнергии на подмагничивание. Разработанный институтом электродинамики модернизированный вариант ЗРОМ с заменой механических ключей тиристорными позволяет осуществлять только дискретное регулирование тока, что уменьшает точность настройки, имеет большое число тиристоров и сложную схему управления ими.

Этих недостатков лишен разработанный в Запорожском национальном техническом институте (ЗМИ) дугогасящий реактор с тиристорным регулятором [6], схема которого приведена на рис. 1.

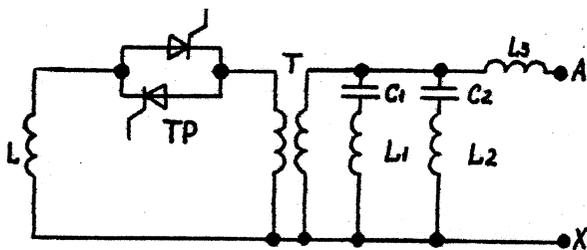


Рисунок 1 – Схема дугогасящего реактора с тиристорным регулятором

Реактор представляет собой понижающий трансформатор Т, ко вторичной обмотке которого через тиристорный регулятор ТР присоединена катушка индуктивности L. На выходе реактора установлен резонансные фильтры  $L_1C_1$  и  $L_2C_2$ , настроенные соответственно на третью и пятую гармоники, и выходная катушка индуктивности  $L_3$ . Регулирование тока осуществляется за счет изменения угла открывания регулятора ТР.

Принцип работы регулятора рассмотрим на примере схемы, представленной на рис. 2. При изменении угла открывания тиристоров от  $\pi$  до критического угла  $\alpha_{кр}$ , равного фазовому углу нагрузки, ток в цепи будет изменяться от нуля до максимального значения, определяемого уравнением

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}, \quad (1)$$

где I – действующее значение тока;

U – действующее значение напряжения;

R – активное сопротивление нагрузки;

$\omega$  – угловая частота переменного тока;

L – индуктивность нагрузки.

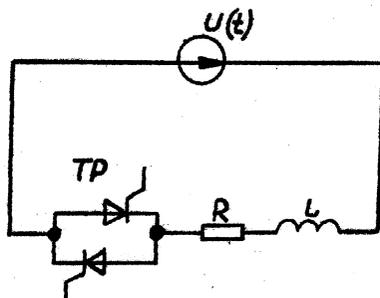


Рисунок 2 – Схема регулятора

Кривая тока в цепи имеет синусоидальную форму только при значении угла открывания тиристоров  $\alpha = \alpha_{кр}$ . При увеличении угла  $\alpha$  от  $\alpha_{кр}$  до  $\pi$  форма

кривой тока будет искажаться. Пренебрегая падением напряжения на тиристорах, процесс в такой цепи может быть описан уравнением

$$U_m \sin(\omega t + \alpha) = Ri + L \frac{di}{dt} . \quad (2)$$

Решая это уравнение относительно тока  $i$ , получим

$$i = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \frac{U_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{\omega t}{\text{tg}\varphi}} , \quad (3)$$

где  $\alpha$  – угол открывания тиристорov;  $\varphi$  – фазовый угол нагрузки;  $Z$  – полное сопротивление нагрузки.

Разложение в ряд Фурье кривой тока для различных значений угла  $\alpha$  показывает, что при фазовом регулировании индуктивной нагрузки возникают высшие гармоники, из которых наиболее существенными являются третья и пятая [4].

Для улучшения гармонического состава тока реактора, изображенного на рис. 1, на входе установлены резонансные фильтры. С учетом резонансных фильтров ДРГ для режима короткого замыкания может быть представлена схемой замещения, приведенной на рис. 3 (намагничивающим током трансформатора пренебрегает).

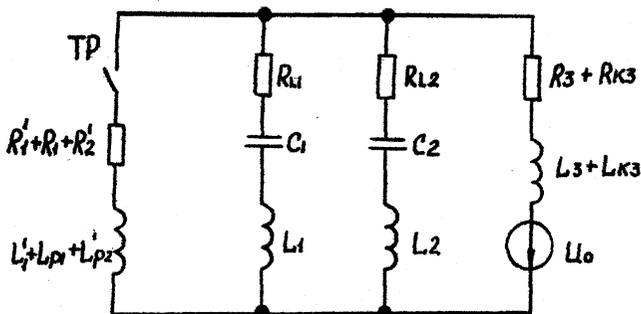


Рисунок 3 – Схема замещения ДРГ для режима короткого замыкания

Параметрами схемы замещения являются:  $R'_1$  и  $L'_1$  – активное сопротивление и индуктивность силовой катушки, приведенное к первичной обмотке трансформатора Т;  $R_1$  – активное сопротивление первичной обмотки трансформатора Т;  $R'_2$  – активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора Т, приведенное к первичной;  $L_{p1}$  и  $L'_{p2}$  – индуктивности рассеяния первично и приведенной вторичной обмоток трансформатора Т;  $R_3$  и  $L_3$  – активное сопротивление и индуктивность выходной катушки фильтра;  $R_{k3}$  и  $L_{k3}$  – активное сопротивление и индуктивность внешнего, по отношению к реактору, контура замыкания тока реактора;  $C_1$ ,  $L_1$  и  $C_2$ ,  $L_2$  – емкости и индуктивности фильтров третьей и пятой гармоник;  $R_{L1}$  и  $R_{L2}$  – активные сопротивления

ния резонансных ветвей фильтров третьей и пятой гармоник. Тиристорный регулятор ТР моделируется ключом.

Рассмотрим работу фильтра на примере подавления третьей гармоники. Активными сопротивлениями катушек индуктивностей пренебрегаем ввиду их малости. Анализ производим для худшего, с точки зрения гармонического состава выходного тока реактора, случая, то есть  $R_{k3} = 0$  и  $L_{k3} = 0$ . Тиристорный регулятор можно рассматривать в этом случае как источник тока первой и третьей гармоник. Тогда схема замещения примет вид, приведенный на рис. 4. Здесь  $I^{(1)}$  и  $I^{(3)}$  токи источников тока первой и третьей гармоник,  $L_{\Sigma} = L_1 + L_{p1} + L_{p2}$  – результирующая индуктивность. Так как  $C_1$ ,  $L_1$  – резонансная ветвь, настроенная на третью гармонику, то должно выполняться условие

$$3\omega L_1 \approx \frac{1}{3\omega C_1}. \quad (4)$$

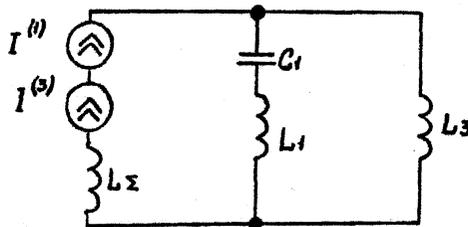


Рисунок 4 – Схема замещения регулятора

Для обеспечения нормальной работы фильтра необходимо выполнить условия

$$\frac{1}{\omega C_1} \gg \omega L_3. \quad (5)$$

$$\left| 3\omega L_1 - \frac{1}{3\omega C_1} \right| \ll 3\omega L_3. \quad (6)$$

В этом случае первая гармоника тока реактора

$$I_p^{(1)} \gg I^{(1)}, \quad (7)$$

а третья гармоника

$$I_p^{(3)} \approx \frac{I^{(3)} \left| 3\omega L_1 - \frac{1}{3\omega C_1} \right|}{3\omega L_3}. \quad (8)$$

Обозначив  $\left| 3\omega L_1 - \frac{1}{3\omega C_1} \right| = X_{pф}$  – сопротивление расстройки резонанс-

ной ветви фильтра, получим

$$I_p^{(3)} \approx \frac{I^{(3)} X_{\text{рф}}}{3\omega L_3}. \quad (9)$$

Полный ток реактора

$$I_{\text{рм}} \approx \frac{U}{\omega(L_{\Sigma} + L_3)}, \quad (10)$$

где  $U$  – напряжение, приложенное к реактору.

Сопоставляя выражения (7), (9) и (10) видим, что гармонический состав выходного тока реактора улучшается с увеличением индуктивности  $L_3$ . В то же время сумма индуктивностей  $L_3$  и  $L_{\Sigma}$  должна оставаться постоянной для выбранного тока реактора. Следовательно, для улучшения гармонического состава тока реактора целесообразно увеличение выходной индуктивности  $L_{\Sigma}$  с одновременным уменьшением индуктивности  $L_3$ , то есть в предельном случае совместить силовую катушку индуктивности с выходной индуктивностью. В этом случае отпадает необходимость установки резонансной ветви для пятой гармоники тока (уровень гармонических составляющих в выходном токе реактора при реальных расстройках фильтра не превысит 5%), что значительно упрощает схему ДРГ. Схема такого реактора приведена на рис. 5, где  $L$  – силовая катушка индуктивности, выполняющая также функции фильтрующей.

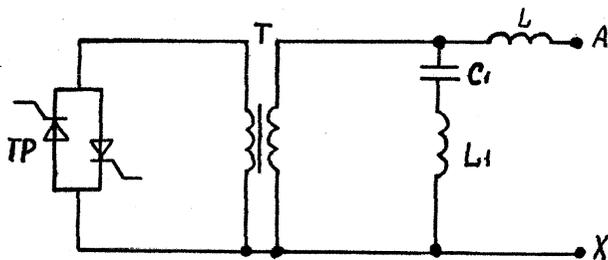


Рисунок 5 – Схема модернизированного реактора

Величина индуктивности  $L$  определяется из условия

$$L = \frac{U_{\phi}}{1,1 \cdot I_{\text{рм}} \omega}, \quad (11)$$

где  $U_{\phi}$  – фазное напряжение сети;

$1,1$  – коэффициент, учитывающий дросселирующее действие обмоток присоединительного трансформатора;

$I_{\text{рм}}$  – максимальное действующее значение тока реактора.

Номинальное напряжение конденсатора фильтра  $C_1$  должно выбираться по линейному напряжению сети, а его емкость – в пределах 1 мкФ на 10 А

тока реактора. Тиристоры регулятора ТР выбираются по вторичному току трансформатора Т на напряжение

$$U_T \geq 1,5\sqrt{2}U_2, \quad (12)$$

где  $U_2$  – вторичное напряжение трансформатора Т.

На базе рассмотренного выше дугогасящего реактора разработана автоматическая система компенсации емкостных токов, работающая в режиме замыкания на землю, которая обеспечивает:

- плавное регулирование в ручном режиме тока реактора в требуемых пределах, а в автоматическом режиме – настройку тока реактора в резонанс с емкостным током сети;
- быстродействующую настройку реактора при изменении параметров сети в режиме замыкания на землю (3...4 периода промышленной частоты).

Функциональная схема разработанной системы приведена на рис. 6. Она включает в себя блок выбора поврежденной фазы (БВПФ), фазовый детектор (ФД), блок пропорционально-интегрального регулятора (БПИР), фазосдвигающее устройство (ФСУ), усилитель мощности (УМ) и блок питания (БП). В состав системы входят также дугогасящий реактор (Р) и объект регулирования (ОР), в качестве которого выступает совокупность устройств распределяющих электроэнергию, то есть линии электропередачи, сборные шины и т.д.

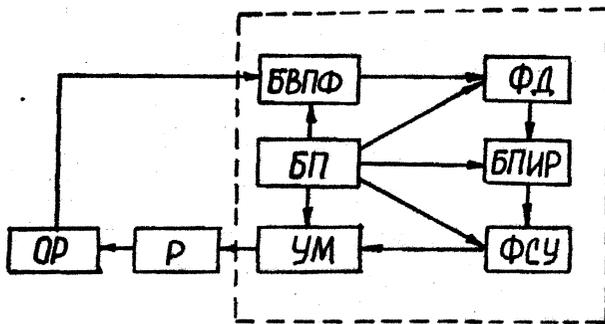


Рисунок 6 – Функциональная схема системы

БВПФ предназначен для определения фазы, на которой произошло замыкание на землю, усиления и фильтрации остаточного напряжения на замкнувшейся фазе, а также фильтрации возникающего при этом напряжения нулевой последовательности.

ФД предназначен для формирования модуля сигнала управления, пропорционального сдвигу фаз между напряжением поврежденной фазы  $U_{\text{пф}}$  и  $U_0$ , а также формирования знака сигнала управления необходимого для пра-

вильного воздействия на тиристорный регулятор дугогасящей катушки.

БПИР предназначен для формирования требуемых точностных и динамических показателей системы управления как элемента замкнутой САУ.

ФСУ предназначено для плавного регулирования индуктивного тока ДГР посредством изменения угла включения встречно-параллельных тиристорных регулятора.

УМ служит для формирования из положительных перепадов напряжения на выходе ФСУ мощных импульсов управления силовыми тиристорами регулятора.

Измерение расстройки компенсации основано на измерении угла между напряжением поврежденной фазы и напряжением нейтрали.

Лабораторные исследования разработанной системы в режиме замыкания на землю подтвердили ее высокие динамические и статические качества. Так, при изменении емкостного тока в 5 раз от среднего значения как в сторону увеличения, так и уменьшения, время переходного режима не превышало 3...4 периода промышленной частоты, при этом переходный процесс носил аperiodический характер с перерегулированием около 3 %. Статическая расстройка компенсации не превышала 1 %.

Промышленные испытания проведены на действующей подстанции 150/35/6 кВ, где установлена система с дугогасящим реактором на максимальный ток 55 А, напряжением 6 кВ. Она позволяет плавно регулировать ток компенсации в пределах 1...20 А, при этом содержание высших гармоник в токе реактора не превышает 3 %. Испытания подтвердили достоверность теоретических положений, рассмотренных выше. Система работает устойчиво при переходных сопротивлениях в месте замыкания порядка 0,5 Ом, что ниже значений, имеющих место в реальных условиях.

### **Выводы.**

1. Разработанная система позволяет осуществлять регулирование тока компенсации как в ручном, так и в автоматическом режиме. Испытания разработанной системы в режиме замыкания на землю подтвердили ее высокие динамические и статические качества

2. Разработанная система позволяет устранить большие резонансные смещения нейтрали в нормальном режиме работы без симметрирования сети и ухудшения добротности контура нулевой последовательности за счет блокировки, регулирующей на величину напряжения нейтрали.

3. Она выполнена в основном из стандартных комплектующих изделий и ее изготовление может быть осуществлено в условиях предприятий энергосистем.

**Список литературы:** 1. *Лихачев Ф.А.* Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с. 2. *Сирота И.М.* Оптимизация режимов нейтрали в электрических сетях напряжением до 35 кВ. – Киев: Общество «Знание»

УССР, 1980. – 30 с. 3. *Сирота И.М.* Режимы нейтрали электрических сетей. – Киев: Наукова думка, 1985. – 64 с. 4. *Цапенко Е.Ф.* Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 134 с. 5. *Булгаков А.А.* Новая теория управляемых выпрямителей. – М.: Наука, 1970. – 320 с. 6. *Рябошапка А.Т., Сичкарь В.М.* и др. А.с. 1117772 (СССР). Дугогасящий реактор. // Б.и. 1984, № 37.

*Поступила в редколлегию 19.03.2007.*

УДК 621.373.5

**М.И.БАРАНОВ**, докт.техн.наук;  
**В.А.БОЧАРОВ; М.А.НОСЕНКО**; НТУ «ХПИ»

## **ПРЕДЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПО РАССЕЙВАЕМОЙ ИМПУЛЬСНОЙ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ОБЪЕМНЫХ РЕЗИСТОРОВ ТИПА ТВО-60**

Наведено деякі результати експериментальних досліджень температурної залежності активного опору і електротермічної стійкості для високовольтних керамічних об'ємних постійних резисторів типу ТВО-60-24 Ом, що розсіюють теплову енергію великих імпульсних струмів у розрядних колах потужних електрофізичних установок.

Some results of experimental researches of temperature dependence of active resistance and electrothermal immunity of high-voltage ceramic volume resistors of TVO-60-24 Ohm type dissipating thermal energy of high pulse current in discharging circuits of high-power electrophysical installations are adduced.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Керамические объемные постоянные резисторы типа ТВО нашли достаточно широкое практическое использование в различных электротехнических устройствах постоянного, переменного и импульсного токов, относящихся к области высоковольтной импульсной техники (ВИТ) [1-4]. Данные резисторы с предельным рабочим импульсным напряжением  $U_p$  от 0,4 до 25 кВ и номинальной постоянной мощностью рассеяния  $P_{пр}$  от 0,125 до 60 Вт в соответствии с требованиями ГОСТ 11324-76 [5] и технических условий ОЖО.467.121 ТУ являются тепло- и влагостойкими постоянными резисторами с изолированным токопроводящим слоем. Этот слой, окруженный снаружи массивной изоляционной прямоугольной фарфоровой оболочкой (рубашкой), изготавливается, как правило, практически прямоугольного поперечного сечения на основе пресованного угольного порошка. Поперечное сечение, длина и плотность запресовки токопроводящего угольного слоя и определяет номинальное активное сопротивление  $R_p$  этих резисторов, состав-