



Авторы:

д.т.н. Бульчев А.В.,
к.т.н. Козлов В.Н.,
Салмин Н.О.,
Соловьев И.В.,
ООО «НПП Бреслер»,
г. Чебоксары, Россия.

D.Sc Bulychev A.V.,
Ph.D Kozlov V.N.,
Salmin N.O.,
Solovyov I.V.,
NPP BRESLER,
Cheboksary, Russia.

ДУГОГАСЯЩИЕ РЕАКТОРЫ С КОНДЕНСАТОРНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ИНДУКТИВНОСТИ

ARC SUPPRESSION REACTORS WITH CAPACITOR REGULATING INDUCTANCE

Аннотация: рассмотрен новый подход к построению дугогасящих реакторов, который основан на применении конденсаторов для изменения индуктивности. Показано, что дугогасящие реакторы с конденсаторным регулированием не генерируют гармоники и ведут себя по отношению к внешней сети как линейные элементы. Выделены их эксплуатационные преимущества.

Ключевые слова: однофазное замыкание на землю, дугогасящая катушка, дугогасящий реактор, силовые конденсаторы.

Annotation: describes a new approach to the construction of arc suppression reactors. This approach is based on the application of capacitors to change the inductance. It is shown that the arc suppression reactors, capacitor control will not generate harmonics and behave towards external networks as linear elements. Allocated to their operational advantages.

Keywords: single-phase earth fault, arc suppression coil, arc suppression reactor, power capacitors.

Распределительные сети с напряжением 6-35 кВ работают, как правило, с изолированной от земли нейтралью, что позволяет сохранять их в работе в течение продолжительного времени при наиболее частых видах повреждений – однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ).

Относительно земли такая сеть представляет собой распределенную емкость, которая, в случае ОЗЗ, обуславливает ток в земле. С током ОЗЗ связан ряд проблем, главная из которых – обеспечение электробезопасности людей, оказавшихся в зоне растекания тока и защита от электрической дуги в месте замыкания. В этой связи, несомненно, необходимо применение специальных мер для подавления (компенсации) емкостного тока замыкания на землю.

Способ компенсации тока ОЗЗ предложен В. Петерсоном, практически, вместе с появлением таких сетей [1], и заключается в заземлении нейтрали сети через катушку индуктивности, ток которой, в силу своей направленности, и компенсирует емкостной ток сети. Такую катушку обычно называют дугогасящей – ДГК, а конструкцию в целом – дугогасящим реактором (ДГР).

Распределительная сеть подобно живому организму постоянно видоизменяется – подключаются/отключаются отходящие от системы шин трансформаторной подстанции линии, подключаются/отключаются распределительные подстанции, изменяется нагрузка и т.д.. Все это требует пропорционального изменения индуктивности ДГР для поддержания требуемого тока компенсации.

Способы изменения индуктивности ДГР

Переключение отпаек ДГК - наиболее простой и распространенный способ регулирования тока компенсации. Исторически в эксплуатации находится большое количество ДГК со ступенчатым регулированием индуктивности.

Количество ступеней регулирования таких ДГК, как правило, невелико – от пяти до девяти, что определяется конструктивной сложностью выполнения высоковольтных отпаяк катушки индуктивности и организации механизма их переключения.

Переключения отпаяк выполняются при отключенной от сети ДГК. Процесс этот достаточно трудоемкий. Он требует: оформления наряда-допуска; отключения ДГК разъединителем; механического переключения коммутатора, расположенного обычно на высоте более 2 метров, и т. д.. Поэтому переключения выполняются только при значительных и долговременных изменениях параметров сети или один раз в 6 лет после измерения емкостного тока сети [2]. Организация этого процесса обычно возлагается на службу изоляции.

Изменение длины немагнитного зазора в магнитопроводе ДГК позволяет плавно изменять ток компенсации.

Обычно в центральном стержне магнитопровода такого ДГК выполняется зазор, изменяемый с помощью плунжерного механизма с электроприводом. Поэтому ДГР данного типа принято называть плунжерными. Это наиболее распространенный, в настоящее время, тип дугогасящего реактора. Он производится в России

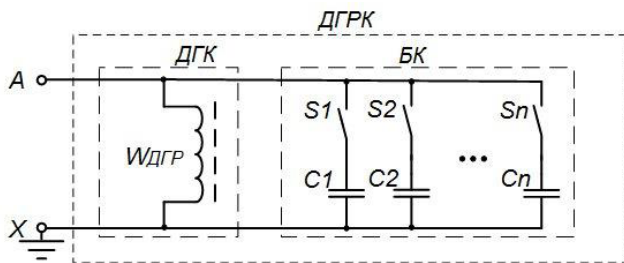


Рис. 1. Принципиальная схема ДГРК

(четыре основных производителя выпускают ДГР типов РДМР и РЗДПОМ), Чехии (фирма EGE – ZTC, ASR), Австрии (фирма TRENCH), Италии (фирма SEA), Китае.

Подмагничивание магнитопровода ДГК позволяет плавно изменять ток компенсации без механических элементов в конструкции ДГР.

Несмотря на внешнюю привлекательность такого решения, количество присущих ему недостатков привело к тому, что кроме России и Китая, никто в мире не рассматривает его практическое применение.

Подключение конденсаторов параллельно нерегулируемой ДГК позволяет изменять ток ДГР за счет изменения эквивалентной проводимости ДГР.

Неоднократно выдвигались предложения [3, 4] поддерживать заданную степень компенсации сети, при ее реконфигурации - подключении/отключении фидеров, за счет отключения/подключения к секции шин заранее подобранных конденсаторов, емкость которых равна емкости соответствующих фидеров.

Основным камнем преткновения в практическом использовании данных предложений являлись характеристики силовых конденсаторов (низкая надежность, малый срок службы, малое количество производителей, высокая цена и т.п.).

Бурное развитие устройств компенсации реактивной мощности (УКРМ) и, соответственно, резко возросший спрос на силовые конденсаторы, привели к появлению в мире большого количества производителей таких конденсаторов и улучшению их характеристик. Срок службы современных силовых конденсаторов составляет 100 000 - 300 000 часов,

т.е. 11,5 - 35 лет [5, 6, 7]. Поэтому **наступило время ДГР с конденсаторным регулированием индуктивности - ДГРК.**

В настоящее время такие реакторы производятся фирмами: Swedish Neutral и НПП Бреслер.

Дугогасящие реакторы с конденсаторным регулированием

На рис.1 приведена принципиальная схема дугогасящего реактора с конденсаторным регулированием. Основные составляющие устройства - простая (не регулируемая) ДГК и блок коммутируемых конденсаторов (БК). Недостатком такого решения является необходимость применения высоковольтных конденсаторов (С) и ключей (S), что приводит к громоздкому и ненадежному конструктивному исполнению. Поэтому практическая реализация ДГРК имеет несколько другой вид - рис.2.

В ДГК рис.2 добавлена силовая вторичная обмотка, к которой и подключаются конденсаторы.

Напряжение вторичной обмотки (обычно 450 – 1000 В) целесообразно выбирать исходя из номенклатуры ключей и конденсаторов. Индуктивное сопротивление ДГК должно быть таким, чтобы создаваемый ею ток ОЗЗ, с учетом развития сети, на 15 - 20 % превышал максимальный текущий емкостной ток. Емкости n конденсаторов выбраны так, чтобы они образовывали безразрывный степенной ряд 2^n . Это позволяет иметь, практически, плавное изменения индуктивного тока ДГРК с шагом заданным минимальной емкостью. Например, в реакторах РДМК-10/400, выпускаемых НПП Бреслер, с максимальным током компенсации 64А, устанавливается 7 конденсаторов. Соответственно, $2^7=128$, и шаг регулирования тока составляет $64/128 = 0,5А$. Следовательно, регулировка возможна от тока 0,5А до 64А. При необходимости можно задать любой шаг регулирования за счет сокращения диапазон регулирования или - изменения количества ступеней (конденсаторов).

Схема замещения силовой части ДГРК приведена на рис.3. Здесь: Z_p – входное сопротивление ДГР; L_{d1} и R_1 – индуктивность рассеяния и активное

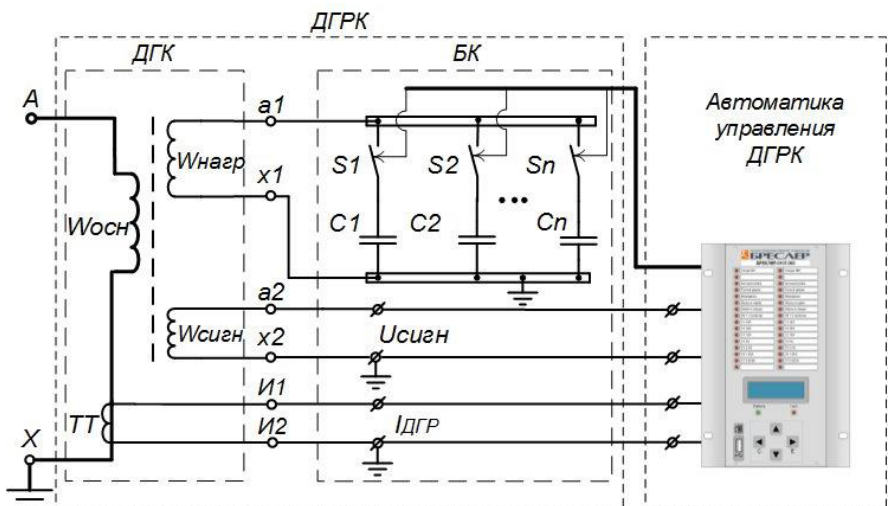


Рис. 2. Структурная схема ДГРК



Булуев
Александр Витальевич

Год рождения: 1956.
В 1980 г. окончил Вологодский политехнический институт по специальности «Электро-снабжение». Защищал докторскую диссертацию в Санкт-Петербургском государственном техническом университете в 1998 г. по специальности «05.14.02 – электрические станции (электрическая часть), сети, электроэнергетические системы и управление ими». Ученое звание профессора присвоено в 2000 г. Общий стаж работы в вузах составляет 30 лет. В настоящее время – технический директор ООО «НПП Бреслер».



Соловьев
Игорь Валерьевич

Дата рождения: 21.10.1984 г. В 2007 году окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Соискатель кафедры "ТОЭиРЗА" ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В настоящее время – начальник отдела оборудования заземления нейтрали ООО «НПП Бреслер».

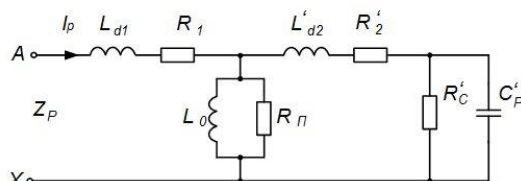


Рис. 3. Схема замещения ДГР с конденсаторным регулированием

сопротивление, соответственно, первичной (рабочей обмотки); L'_{d2} и R'_2 – индуктивность рассеяния и активное сопротивление, соответственно, нагрузочной обмотки, приведенные к первичной (рабочей обмотке); L_0 и R_{Π} – соответственно, индуктивность намагничивания и эквивалентное сопротивление потерь; C'_p и R'_c – соответственно регулирующая емкость и сопротивление приведенные к первичной обмотке.

Относительно входных зажимов А-Х реактор представляет собой двухполюсник, входной ток I_p которого регулируется с помощью C'_p . Поскольку регулирующая емкость отделена от зажимов двухполюсника другими элементами и образует со вторичной обмоткой реактора дополнительный колебательный контур, возникает ряд вопросов:

- о линейности регулировочной характеристики $I_p = f(C'_p)$;
- о дополнительных гармонических искажениях, вносимых реактором;

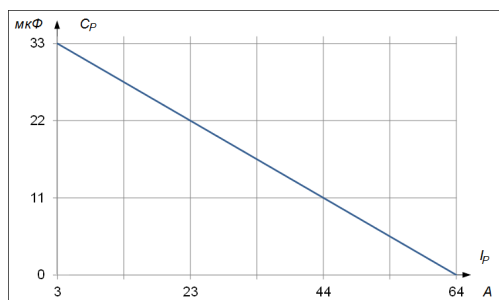


Рис. 4. Регулировочная характеристика ДГРК

- о возможности резонанса регулировочного контура ДГРК на частотах сети.

В настоящее время в эксплуатации находятся более 100 ДГРК производства НПП Бреслер различной мощности (от 80 до 1600 кВА) и исполнений (масляное, сухое, дугогасящие агрегаты). Проведены всесторонние исследования этих реакторов, как путем математического моделирования, так и путем лабораторных и натурных испытаний на действующих подстанция [8].

Для примера на рис.4 приведена экспериментальная регулировочная характеристика ДГРК типа РДМК-10/400. Как видно она линейна. В принципе, при наличии автоматики управления с обратной связью, линейность этой характеристики особой роли не играет, достаточно чтобы она была монотонной.

На рис.5 приведена типичная осциллограмма металлического замыкания на землю

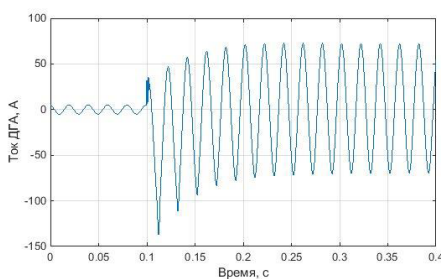
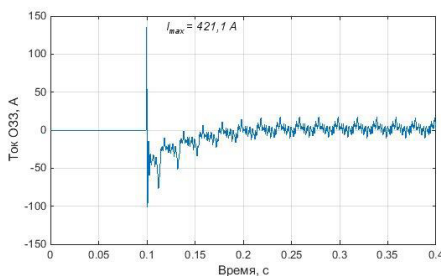
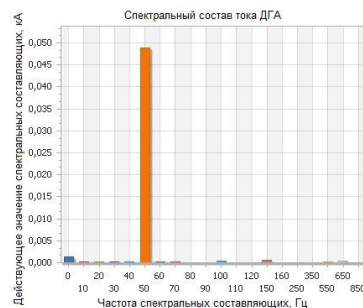
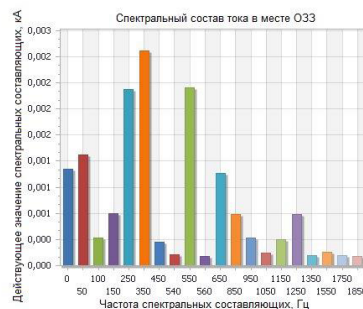


Рис. 5. Экспериментальные осциллограммы металлического ОЗЗ в сети с ДГРК





Козлов

Владимир Николаевич

Дата рождения: 15.08.1952 г.
Окончил Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова в 1975 г., кафедра «Электрические аппараты». В 1985 г. защитил кандидатскую диссертацию в Ленинградском политехническом институте на тему «Комплексная защита судовых генераторов». Доцент каф. «ТОЭ и РЗА» Чувашского государственного университета, главный конструктор ООО «НПП Бреслер».



Салмин

Николай Олегович

Дата рождения: 11.10.1990 г.
В 2013 г. окончил магистратуру ЧГУ им. И.Н. Ульянова по профилю "Электроэнергетические системы, сети, электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность".
В настоящее время - инженер ООО "НПП Бреслер".



Терминал автоматического управления ДГРК

Цифровые индикаторы напряжения 3 Уо

Переключатели выбора режима работы

Тумблеры ручного управления ДГРК

Рис. 6. Общий вид панели управления шкафа «Бреслер-0107.060.2К»

и спектральный состав токов, соответственно, в месте замыкания и цепи ДГРК, полученные при натурных испытаниях [8]. Из рисунков видно, что ДГРК является линейным устройством и не порождает дополнительных гармонических составляющих.

У плунжерных ДГР перестройка реактора занимает от 20 до 120 с, и определяется временем перемещения плунжера. При малых временах перемещения необходимо учитывать время выбега двигателя, что усложняет автоматику управления ДГР. Время перестройки ДГРК определяется временем переключения контакторов, применяемых для коммутации емкостей, примерно, 15 - 30 мс.

Аналогично плунжерному ДГР, управление ДГРК может выполняться, как автоматически, так и вручную. На рис. 6 приведен общий вид панели управления шкафа автоматики управления «Бреслер-0107.060.2К», предназначенный для подключения двух ДГРК. Принцип действия автоматики ничем не отличается от управления плунжерными ДГР [9]. Режим ручного управления задается специальным ключом на панели шкафа, или устанавливается автоматически при отказе микропроцессорного терминала. В этом режиме подключение/отключение емкостей определяется положением соответствующих тумблеров, напротив которых указана величина «коммутируемого» тока. В качестве индикатора настройки выступает вольтметр, отображающий величину напряжения на нейтрали.

Выводы

1. Дугогасящие реакторы с конденсаторным регулированием не имеют механических движущихся частей, и обладают рядом преимуществ перед наиболее распространенными плунжерными реакторами. Они имеют более высокую надежность, малое время перестройки,

более низкую цену, обеспечивают простой и наглядный контроль емкостного тока сети, не требуют трудоемкого обслуживания в процессе эксплуатации,

2. Эксплуатационные характеристики современных конденсаторов позволяют выполнять дуугогасящие реакторы с конденсаторным регулированием с долговечностью, соответствующей сроку эксплуатации основного оборудования подстанций.

3. Дугогасящие реакторы с конденсаторным регулированием в рабочем диапазоне токов являются линейными элементами и не генерируют гармонических составляющих в компенсируемой сети.

Литература

1. Petersen W., Neutralizing of ground fault current and suppression of ground fault arcs through the ground fault reactor, E.T.Z. – 1919.
2. Правила устройства электроустановок. Издание 7-е. Утверждено приказом Минэнерго РФ от 08.07.2002.
3. Авторское свидетельство СССР №598171. Устройство для компенсации емкостного тока замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью с несколькими отходящими линиями // А.П. Ксенофонтов - Оpubл. в Б.И. №10. – 1978.
4. Авторское свидетельство СССР №748621. Устройство для быстрой действующей компенсации емкостного тока замыкания на землю в сети переменного тока // Д.Н. Степанчук, В.Ф. Солдатов, В.П. Кобазев. – Оpubл. в Б.И. №26. – 1980.
5. www.zez-silko.ru. Компенсационные конденсаторы.
6. www.electronicon.com. (www.powerscapacitors.info).
7. www.electronics.ru. Романова И. Конденсаторы компании EPCOS для коррекции коэффициента мощности тока // Электроника. – 2011. – №7 (00113). – С. 60-65.
8. Бульчев А.В., Козлов В.Н. и др. Дугогасящий агрегат. Испытания результаты исследования // Новости Электро Техники. – 2015. – №4(94). – С.1, 30-32.
9. Козлов В.Н., Бульчев А.В. Современная автоматика управления дуугогасящими реакторами для компенсации емкостного тока замыкания на землю в сетях 6-35 кВ. // Энергоэксперт. – №1. – 2014. – С. 38-43.