

Авторы:

к.т.н. Пашковский С.Н.,
Чернов Н.Ю.,
ООО НПП «ЭКРА»,
г. Чебоксары, Россия,
д.т.н. Вайнштейн Р.А.,
Томский политехниче-
ский университет,
г. Томск, Россия.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ ДУГОГАСЯЩИХ РЕАКТОРОВ ДЛЯ СЕТЕЙ 6-35 КВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА НАЛОЖЕНИЯ ТОКА НЕПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Аннотация: в статье рассмотрены варианты реализации устройств для непрерывного измерения степени расстройки компенсации и автоматической настройки дугогасящих реакторов в электрических сетях 6-35 кВ на основе метода наложения на первичные цепи тока не промышленной частоты. Приводится описание и сравнение трех вариантов реализации этого метода и рекомендации о целесообразности области применения каждого из них. Разработанные устройства технически согласованы с дугогасящими реакторами, индуктивность которых регулируется изменением воздушного зазора магнитопровода. Приводятся результаты лабораторных испытаний и сведения об опыте эксплуатации в электрических сетях.

Ключевые слова: компенсация емкостного тока, расстройка компенсации, наложение тока не промышленной частоты, контур нулевой последовательности, добротность.



Пашковский
Сергей Николаевич

Дата рождения: 07.12.1983.

В 2006 г. окончил Оренбургский государственный университет.

В 2010 г. защитил кандидатскую диссертацию в Новосибирском государственном техническом университете (НГТУ) на тему «Исследование и разработка защиты от замыканий на землю в электрических сетях с комбинированным заземлением нейтрали».

Заведующий отделом защит низкого напряжения ООО НПП «ЭКРА».

Электрические сети с заземлением нейтрали через дугогасящие реакторы (ДГР) в отечественной практике являются наиболее распространенным видом распределительных сетей городов и крупных промышленных предприятий. Необходимость поддержания настройки ДГР, близкой к резонансной, в настоящее время не вызывает сомнения. Влияние возможного отклонения настройки от резонансной снижает эффективность применения ДГР, что показано в ряде работ, например, в [1] и [2]. В работе [1] анализируются все факторы, влияющие на эффективность применения ДГР, а в работе [2] обращается внимание на особую важность скорости восстановления напряжения после погасания дуги и отмечается, что «...в особенности важна начальная скорость возрастания огибающей (напряжения), которая является мерой к повторному зажиганию дуги». В связи с этим важно то, что на начальную скорость восстановления напряжения в равной степени влияют как расстройка компенсации (ν), так и коэффициент демпфирования (d), определяемый как отношение суммарной активной проводимости к емкостной проводимости фаз сети. Влияние отклонения настройки от ре-

зонансной на действующее значение тока в месте замыкания значительно ослабляется из-за тока высших гармоник ($I_{\text{вг}}$), значение которого может быть соизмеримо с суммарным емкостным током промышленной частоты. Принимая во внимание многофакторность влияния перечисленных выше параметров (ν , d , $I_{\text{вг}}$), вопрос о величине допустимого отклонения ($\Delta\nu$) от точной настройки в резонанс на частоте 50 Гц, по нашему мнению, требует дополнительной проработки. До проработки этого вопроса разработчики устройств автоматической настройки ДГР должны ориентироваться на требования, приведенные в [3].

Согласно [3 и 4] сети с компенсацией емкостного тока должны быть оснащены устройствами для измерения степени расстройки компенсации и автоматической настройки ДГР и обеспечивать настройку ДГР, близкую к резонансной. Влияние точности настройки компенсации емкостного тока на процессы при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) исследовано в работе Ф.А. Лихачева [1]. В работе [2] обеспечение резонансной настройки у ДГР связывают с фактором скорости восстанавливающегося напряжения на поврежденной фазе. Отно-

сительно этого параметра в [5] отмечается, что «...следует заметить, что скорость восстановления напряжения на поврежденной фазе после погасания дуги зависит и от потерь в сети: чем сеть добротнее, тем медленнее затухает колебательный переходный процесс в сети и тем медленнее восстанавливается напряжение на поврежденной фазе». В связи с изложенным автоматическое поддержание настройки ДГР, близкой к резонансной $\nu = \pm(1\div3) \%$, является обоснованной и важной задачей.

В настоящее время известно большое количество устройств для автоматической настройки ДГР отечественных и зарубежных производителей. Наибольшее распространение получили устройства, осуществляющие настройку ДГР в нормальном режиме работы электрической сети (до замыкания на землю). При этом задача в целом достаточно эффективно решается в сочетании с выпускаемыми промышленностью ДГР с изменяемым немагнитным зазором магнитопровода (плунжерного типа).

Одним из возможных известных методов решения задачи измерения расстройки компенсации и автоматической настройки ДГР является метод наложения на сеть тока с частотой, отличающейся от промышленной. В известных авторах устройства, основанных на наложении на сеть токов непромышленной частоты, фильтрами выделяют токи и напряжения этой частоты, вычисляются аппаратными средствами емкостное и индуктивное сопротивления контура нулевой последовательности и далее определяется их соотношение, которое характеризует расстройку компенсации [6]. В то же время для решения задачи измерения степени расстройки компенсации определение абсолютных значений емкостного и индуктивного сопротивлений контура нулевой последовательности не требуется, а необходимо определить лишь их относительное отличие.

Один из вариантов решения такой задачи состоит в том, что специальный вспомогательный источник с частотой 25 Гц, называемый далее источником контрольного тока (ИКТ), включается последовательно в цепь ДГР. При таком включении ИКТ должен удовлетворять определенным требованиям, важнейшим из которых является отсутствие влияния на работу ДГР при замыкании на землю. Такой ИКТ подробно описан

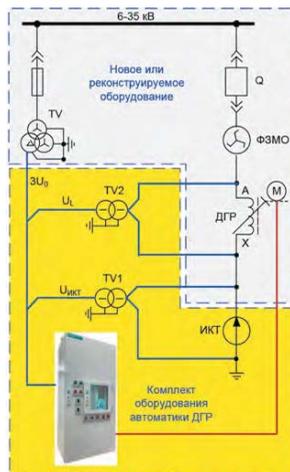


Рис. 1. Схема подключения комплекта непрерывного измерения расстройки компенсации и последующего управления настройкой ДГР с включением ИКТ последовательно в цепь ДГ

в работе [7]. Важным преимуществом такого решения является возможность совмещения функции непрерывного контроля степени расстройки компенсации емкостного тока с решением задачи селективного выявления поврежденного фидера с ОЗЗ. Это особенно важно для электрических сетей, питающихся от шин распределительного устройства генераторного напряжения электростанций. На таких объектах, как правило, имеются мощные электрические машины (генераторы, двигатели), подключенные непосредственно на генераторное напряжение. Использование метода наложения на сеть вспомогательного тока непромышленной частоты позволяет обеспечить селективную защиту у электрических машин без зоны нечувствительности вблизи нейтрали [8, 9, 10].

На рис. 1 показана схема включения ИКТ и устройства для непрерывного измерения степени расстройки компенсации для последующей настройки ДГР.

Работа системы измерения расстройки компенсации и автоматизации управления настройкой ДГР по рис. 1 основана на измерении опорного напряжения ($U_{ИКТ}$) на ИКТ и напряжения на индуктивности ДГР (U_L) и дальнейшем формировании в программной части микропроцессорного регулятора их отношения, которое однозначно связано с расстройкой компенсации. В частности, при частоте, равной половине промышленной, это отношение равно



Чернов
Никита Юрьевич

Дата рождения: 16.07.1991.
В 2014 г. окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова по программе магистратуры «Электроэнергетика и электротехника». Руководитель группы отдела защит низкого напряжения ООО НПП «ЭКРА».



Вайнштейн
Роберт Александрович

Дата рождения: 01.08.1937.
В 1960 г. окончил Томский политехнический институт по специальности «Электрические станции сети и системы». В 2011 г. защитил докторскую диссертацию на тему: «Защита от замыканий на землю генераторов и сетей среднего напряжения на основе использования низкочастотных составляющих токов нулевой последовательности» в Томском политехническом университете. Профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Томского политехнического университета.



$$\frac{U_L}{U_{\text{ИКТ}}} = \frac{1}{3 - 4\nu}. \quad (1)$$

Здесь $\nu = 1 - \frac{I_L}{I_C}$ – расстройка компенсации, где

$$I_L = \frac{U_\phi}{\omega_{\text{П}} L} \text{ и } I_C = U_\phi \omega_{\text{П}} C - \text{ суммарный ток ДГР и}$$

суммарный емкостный ток сети, U_ϕ – фазное напряжение, $\omega_{\text{П}}$ – промышленная частота.

Однозначная связь между величиной $\frac{U_L}{U_{\text{ИКТ}}}$

и расстройкой компенсации по (1) сохраняется при недокомпенсации ($\nu > 0$) до 75 %, при перекомпенсации ($\nu < 0$) без ограничений.

В микропроцессорном регуляторе из измеренных опорного напряжения на ИКТ и напряжения на индуктивности ДГР формируется сигнал, линейно зависящий от расстройки компенсации:

$$A_\nu = \frac{K_{\text{П}}}{4} \left(3 - \frac{U_{\text{ИКТ}}}{U_L} \right), \quad (2)$$

где $K_{\text{П}}$ – коэффициент пропорциональности.

В общем случае, в электрической сети может быть установлено несколько ДГР, подключенных к нейтралю разных трансформаторов. Для практической реализации измерения расстройки компенсации указанным выше способом ИКТ должен включаться в объединенную заземляемую шину всех ДГР. Напряжение на индуктивности (U_L) практически может измеряться на одном из ДГР из этой группы.

В схеме на рис. 1 для измерения напряжения $U_{\text{ИКТ}}$ и напряжения U_L используются типовые измерительные однофазные трансформаторы напряжения (ТН) типа ЗНОЛ-06.10. Выдача сигналов управления на мотор-привод редуктора плунжера ДГР осуществляется от микропроцессорного терминала, размещенного в составе комплекта оборудования автоматики управления ДГР.

Так как по принципу действия разработанное устройство работает правильно только в нормальном режиме сети, то в составе комплекта оборудования автоматики управления ДГР предусматривается выведение его из работы при возникновении замыкания на землю. Для этого по факту появления напряжения нулевой последовательности $3U_0$, цепи управления ДГР блокируются, а входные цепи отключаются от ТН TV1 и TV2 контактами промежуточных реле, входящих в состав комплекта оборудования (на схеме рис. 1 не показаны).

При использовании плунжерных ДГР существенным фактором, ограничивающим точность настройки, особенно в диапазоне малых значений расстроек компенсации, является время выбега асинхронного двигателя реверсивного привода мотор-редуктора плунжера. В работе [11] в качестве одного из методов

решения данной проблемы предложено использовать автоматический учет механических параметров и кинематической схемы привода реактора. Техническая реализация такого предложения является достаточно сложной. Уменьшение влияния выбега привода в неработающем устройстве достигнуто тем, что применено динамическое торможение электродвигателя после его отключения [12], которое может быть реализовано для типовых ДГР без вмешательства в конструкцию привода. Динамическое торможение одновременно обеспечивает значительно меньшую зависимость работы системы от параметров ее элементов, некоторые из которых могут изменяться случайным образом. Таким нестабильным параметром является момент сопротивления на валу электродвигателя, который зависит от состояния привода и окружающей температуры.

Благодаря тому, что по принципу действия сигнал, пропорциональный расстройке компенсации, определяется отношением двух напряжений и не зависит от их абсолютного значения, настройка и калибровка всей системы измерения расстройки компенсации и автоматики управления настройкой ДГР может выполняться как непосредственно на объекте применения перед вводом в работу, так и на предприятии-производителе оборудования. Для настройки и периодической проверки разработанного устройства используется широко распространенный типовой комплект испытательного оборудования для устройств РЗА, например, испытательная установка РЕТОМ или Omicron.

Измеритель расстройки компенсации, основанный на описанном выше принципе эксплуатируется с февраля 2018 г. на Западно-Сибирской ТЭЦ. Замечаний за период эксплуатации устройства не зафиксировано.

Развитием метода наложения тока непромышленной частоты является другой, практически более удобный вариант наложения вспомогательного тока. В этом варианте источник контрольного тока частотой 25 Гц включается во вторичную обмотку однофазного измерительного ТН, подключенного своей первичной обмоткой к нейтральной точке сети, например, параллельно дугогасящему реактору, как показано на рис. 2.

Практическая реализация такого варианта основана на том, что к настоящему времени в НПП «ЭКРА» разработана аппаратура для наложения контрольного тока через типовые измерительные ТН с целью выполнения защиты от замыкания на землю обмотки статора синхронных генераторов [13, 14]. Существенным отличием такой аппаратуры для ее применения в целях контроля степени расстройки компенсации является то, что для измерения параметров сети не требуется большая мощность источника контрольного тока. Это позволяет источник наложения выполнить на полупроводниковой элементной базе и существенно уменьшить габариты его элементов. Разработанный

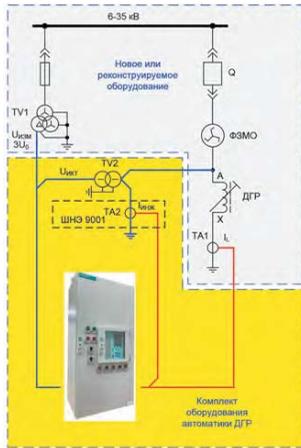


Рис. 2. Схема подключения комплекта измерения расстройки компенсации и автоматики управления настройкой ДГР с наложением контрольного тока через ТН

управляемый электронный генератор контрольного тока входит в состав шкафа автоматики управления настройкой ДГР. В отличие от варианта включения ИКТ непосредственно в первичную цепь ДГР, в этом варианте для формирования сигнала, пропорционального расстройке компенсации, измеряется сумма токов всех ДГР и ток в цепи заземления ТН. Существенно, что с развитием цифровых технологий передачи информации организовать измерение суммарного тока у нескольких ДГР можно независимо от их взаимного расположения. При классическом способе построения подстанции (ПС) подключение всех вторичных цепей осуществляется обычным контрольным кабелем, так как отстройка от наведенных помех осуществляется с

помощью соответствующей фильтрации по основной частоте полезного сигнала.

Принципиально технически также возможно наложение контрольного тока через обмотку, соединенную по схеме «разомкнутый треугольник» измерительного ТН, подключенного к шинам распределительного устройства ПС. Такое подключение требует наличия на секции шин выделенной ячейки для отдельного ТН, что не всегда возможно обеспечить.

Третий вариант разработанного и технически реализованного устройства основан на наложении через типовой однофазный ТН токов двух частот 25 Гц и 75 Гц. В этом варианте источник контрольного тока включается во вторичную обмотку однофазного измерительного ТН, аналогично тому, как показано на рис. 2. Практически наложение токов двух частот обеспечивается тем, что источник формирует импульсы специальной формы, следующие с частотой 25 Гц и поэтому содержит в своем составе третью гармонику с частотой 75 Гц. Для формирования сигнала о расстройке компенсации к устройству подключаются цепи от «разомкнутого треугольника» группы измерительных ТН секции шин.

Основные способы размещения однофазного ТН для наложения токов, располагаемого вблизи ДГР, приведены на рис. 3.

Устройство, основанное на рассматриваемом способе, не критично к любой конфигурации сети и к любому расположению дугогасящих реакторов по ПС и сохраняет работоспособность в сетях с большой естественной несимметрией и пониженным уровнем добротности контура нулевой последовательности.

Влияние активной проводимости изоляции сети на величину абсолютной погрешности при фактиче-

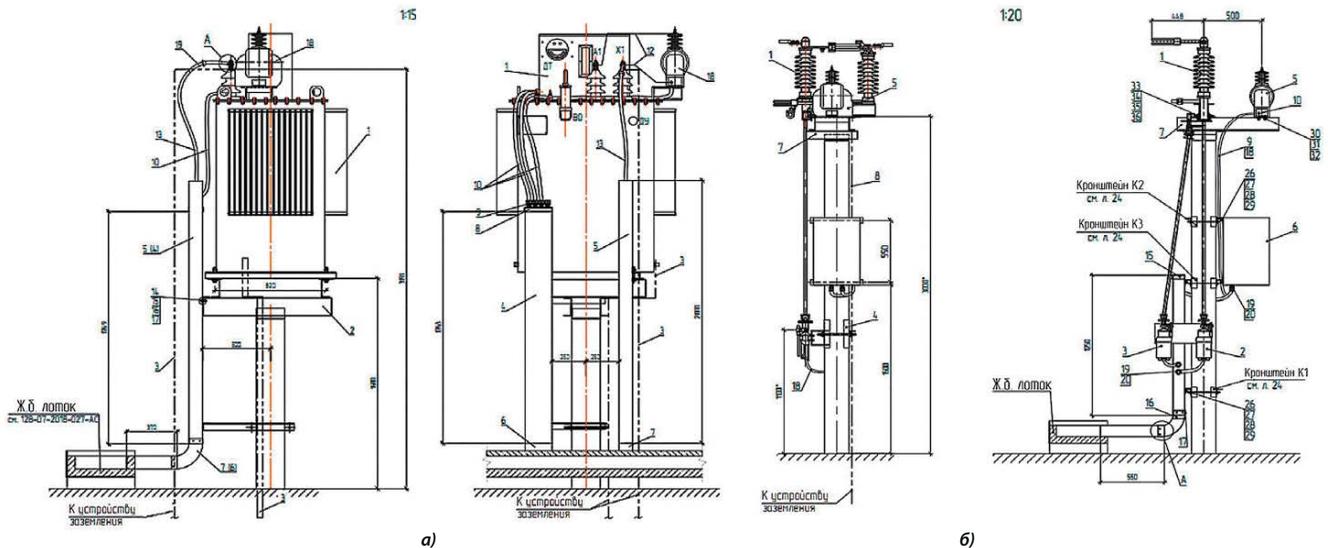


Рис. 3. Способы размещения однофазного ТН типа ЗНОЛ на ДГР:

- а) с использованием кранштейна и крепежа на ДГР;
- б) с использованием крепежа на площадке однополюсного разъединителя в цепи нейтрали к ДГР

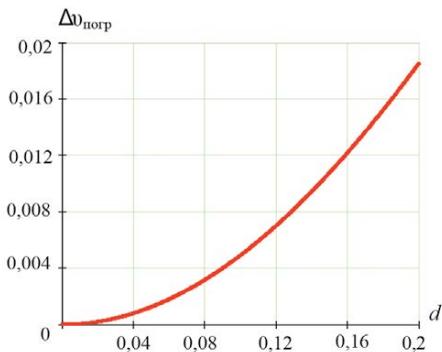


Рис. 4. Зависимость абсолютной погрешности измерения U при фактически точной настройке при различных коэффициентах демпфирования сети (метод наложения тока двух частот)

ски точной настройке приведена на рис. 4. Влияние активной проводимости проявляется как недокомпенсация. При типичном значении $d=0,05$ абсолютная погрешность от влияния активных проводимостей фаз составляет 0,00124. В настоящее время применяется режим комбинированного заземления нейтрали, который заключается в том, что параллельно к ДГР подключается резистор с активной проводимостью равной 0,15-0,20 от емкостной проводимости фаз сети относительно земли. Коэффициент демпфирования d при этом составляет порядка 0,2. Даже при таком значении абсолютная погрешность измерения расстройки компенсации не превышает 0,02. Такие значения погрешности измерения не являются препятствием для практической реализации предлагаемого способа измерения расстройки компенсации, так как погреш-

ность может быть скомпенсирована в программной части измерительного органа в зависимости от фактической величины коэффициента демпфирования сети.

Таблица 1. Основные технические характеристики разработанной системы

Наименование характеристики	Значение характеристики
Количество одновременно управляемых реакторов одним регулятором в гальванически не связанных участках сети	1 или 2
Точность измерения расстройки компенсации	$\pm 1\%$
Диапазон измерения степени расстройки компенсации	$\pm 70\%$
Индикация текущего значения расстройки компенсации	Да
Номинальное напряжение питания шкафа	$\sim 220\text{ В} (=220/110)$
Напряжение питания цепей привода управления ДГР	$\sim 380\text{ В}$
Возможность управления несколькими ДГР (их комбинацией) при объединении секций на параллельную работу с использованием цифровых каналов связи	Да
Работа в сети с пониженной добротностью контура нулевой последовательности (комбинированное заземление нейтрали)	Да
Возможность управления заземляющим резистором для обеспечения работы защит от ОЗЗ	Да
Порты связи, в том числе для организации передачи данных с учетом цифровой архитектуры построения сети	2xRS-485, 2xEthernet
Осциллографирование событий и аварийных процессов, передача на верхний уровень АСУ ТП	Да
Автоматическое ведение журнала событий настройки ДГР, возникновения ошибок и аппаратных неисправностей, ОЗЗ с сохранением текущих параметров (расстройки компенсации, ток компенсации, напряжения на нейтрали и пр.)	Да

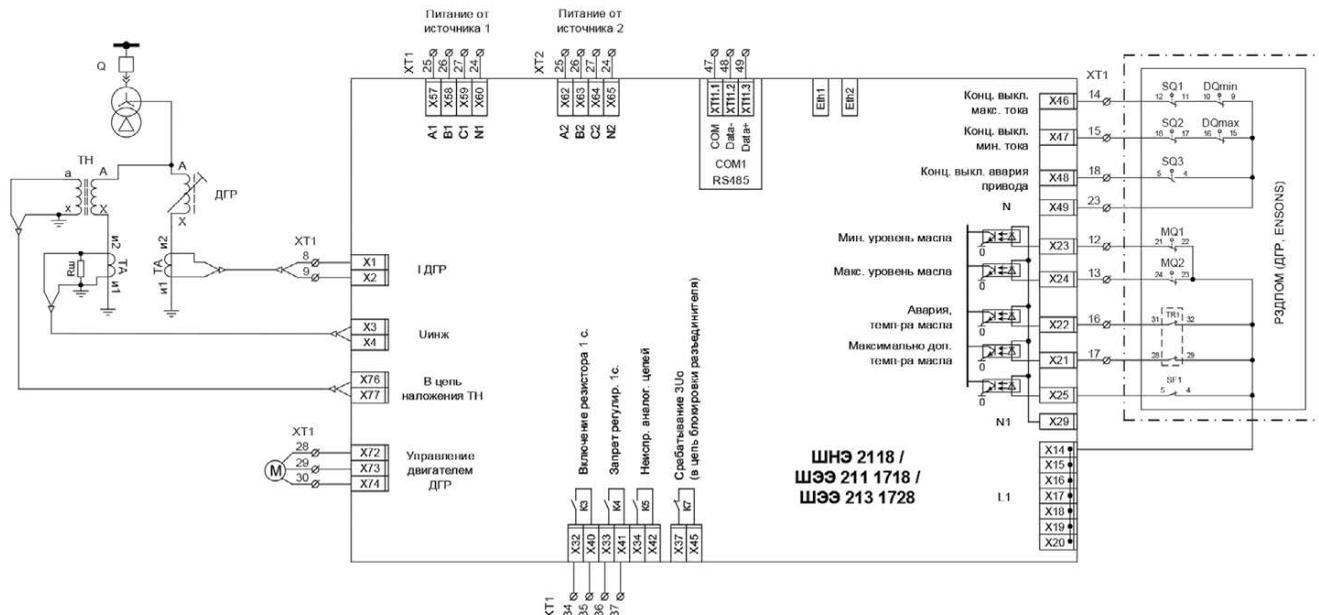


Рис. 5. Схема подключения комплекта оборудования на базе шкафа ШНЭ 2118 / ШЭЭ 211 1718 / ШЭЭ 213 1718 к РЗДПОМ фирмы ENSONS

Для всех методов разработаны алгоритмы обработки сигналов, создаваемых токами непромышленной частоты, при которых величина, характеризующая расстройку компенсации, не зависит от абсолютного значения суммарного емкостного тока сети, напряжения естественной несимметрии и сохраняется ее правильное измерение при максимально возможных на практике значениях расстройки компенсации.

Предложенные методы технически реализованы, испытаны в лабораторных условиях на специальной физической модели и с использованием программно-технического комплекса RTDS в различных режимах. Устройства систем автоматики ДГР, основанные на предложенных методах, в настоящее время внедрены на ряде объектов.

Основные технические характеристики системы измерения расстройки компенсации и автоматического управления настройкой ДГР приведены в табл. 1, а на рис. 5 дана схема подключения.

Выводы

1. Использование методов наложения на сеть тока непромышленной частоты позволяет полноценно решить задачу измерения степени расстройки компенсации и автоматической настройки дугогасящих реакторов.

2. Устройства, основанные на наложении токов непромышленной частоты:

- не подвержены влиянию напряжения естественной несимметрии сети и поэтому работоспособны в распределительных сетях с протяженными участками воздушных линий;
- сохраняют работоспособность в компенсированных сетях с пониженным уровнем добротности контура нулевой последовательности, например, в сетях с комбинированным заземлением нейтрали;
- не подвержены влиянию состава и характера нагрузки, в том числе, являющейся источником высших гармоник (металлургия, сварка и т.п.).

Литература:

1. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
2. Вильгельм Р., Уотерс М. Заземление нейтрали в высоковольтных системах. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 415 с.
3. Стандарт организации «Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА» СТО 56947007-29.120.70.241-2017 с изменениями от 11.12.2019 г.
4. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. Утверждены Приказом Министерства энергетики Российской Федерации №229 от 19.06.2003 г.
5. Техника высоких напряжений / под ред. Д.В. Разевига. - М.: Энергия, 1976.
6. Гумин М.И. Автоматизация компенсации емкостных токов замыкания на землю в электрических сетях: Обзорная информация. - М.: Информэнерго, 1988. - 48 с.
7. Непрерывный контроль степени расстройки компенсации и автоматическая настройка дугогасящих реакторов в электрических сетях 6-10 кВ на основе наложения тока с частотой 25 Гц / Вайнштейн Р.А., Березницкий С.Л., Юдин С.М., Шестакова В.В. // Известия вузов. Электромеханика. - 2004. - №4. - С. 54-59.
8. Вайнштейн Р.А., Головки С.И., Григорьев В.С. и др. Защита от замыканий на землю в компенсированных сетях 6-10 кВ // Электрические станции. – 1998. – №7. – С. 26–30.

9. Вайнштейн Р.А., Гетманов В.Т., Шмойлов А.В. и др. Стопроцентная защита от замыканий на землю обмотки статора гидрогенераторов Красноярской ГЭС // Электрические станции. – 1972. – № 2. – С. 41–43.

10. Вайнштейн Р.А., Бобрин В.Д., Волков Г.А. Опыт эксплуатации и модернизации защиты от замыканий на землю в обмотке статора гидрогенераторов Красноярской ГЭС // Электрические станции. – 1992. – № 9. – С. 12–15.

11. Задачи автоматического управления режимом компенсации тока замыкания на землю / Ширковец А.И., Валов В.Н., Петров М.И. // Релейная защита и автоматизация. - 2015. - №2(19). - С. 32-38.

12. Голован А.Т., Электропривод. Теоретические основы. - М.: Энергетическое издательство, 1948. - 419 с.

13. Вайнштейн Р.А., Доронин А.В., Наумов А.М., Юдин С.М. Защита от замыканий на землю в обмотке статора генераторов в схеме блоков с реактивной отпайкой // Известия вузов. Сер. Электромеханика. - 2011. - № 6. - С. 96-101.

14. Цифровые защиты генераторов, трансформаторов и блоков генератор-трансформатор электростанций. Техническое описание. ЭКРА.656116.360 ТО. 2018.