

В профессиональном сообществе не прекращаются дискуссии относительно технологий гашения электрической дуги в месте однофазного замыкания на землю. Публикации на эту тему регулярно появляются в «Новостях ЭлектроТехники». Обсуждается эффективность не только традиционных решений (применение дугогасящих реакторов, включаемых между нейтралью сети и землей), но и новых, которые способны работать в современных распределительных сетях значительной протяженности, с большой эквивалентной емкостью.

О возможностях обеспечить эффективное гашение электрической дуги при ОЗЗ с большими токами и тем самым повысить пожарную и электробезопасность в распределительных сетях – в материале специалистов «НПП Бреслер».

ГАШЕНИЕ ДУГИ ПРИ ОЗЗ

Предельные возможности ДГР

Поступательное развитие распределительных сетей классов напряжения 6–35 кВ приводит к существенному увеличению их протяженности и эквивалентной емкости. Вместе с этим неуклонно увеличиваются токи однофазного замыкания на землю (ОЗЗ), которые достигают в некоторых сетях сотен ампер. При этом методические и практические возможности компенсации токов ОЗЗ с помощью пассивных элементов (электромагнитных дугогасящих реакторов) исчерпаны. Остаточный ток, который неизбежно остается нескомпенсированным дугогасящим реактором при токах более 100 А, превышает опасный уровень 5 А и может поддерживать устойчивое горение электрической дуги в месте повреждения.

Дугогасящие реакторы (ДГР) в настоящее время являются основным средством гашения электрической дуги в случае ОЗЗ. Основанием для их установки являются Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ [1], в которых регламентированы допустимые значения емкостного тока во время ОЗЗ. Основная составляющая этого тока компенсируется с помощью индуктивного тока, создаваемого ДГР. Однако через место повреждения циркулирует не только реактивный ток основной частоты, но также активный ток с частотой 50 Гц и высшие гармонические составляющие тока сети [2]. Эти составляющие и активный ток невозможно скомпенсировать, используя только ДГР, вследствие его принципиальных ограничений.

Дальнейшие усилия по совершенствованию реакторов и автоматике управления ими дают незначительные результаты по снижению величины нескомпенсированного остаточного тока. Поэтому требуется тщательное исследование возможности ДГР эффективно гасить электрическую дугу при ОЗЗ с учетом современного состояния распределительных сетей напряжением 6–35 кВ.

Анализу подлежат параметры сетей, присоединенных к 99 секциям 43-х действующих подстанций напряжением 6–10 кВ. На 90 секциях установлены дугогасящие реакторы плунжерного типа различных производителей и на 9 – ДГР с конденсаторным регулированием производства ООО «НПП Бреслер» [3].

Все ДГР оснащены микропроцессорной автоматикой управления «Бреслер-0107.060», обеспечивающей точную установку значения расстройки компенсации < 1% и осциллографирование процесса ОЗЗ [4].

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЕТИ

Для исследования были использованы наиболее важные из доступных параметров секций: значение емкостного тока $I_{\text{емк}}$, расстройки компенсации V и добротности сети Q . В результате обработки осциллограмм получены еще три параметра, представляющие интерес: активная составляющая тока ОЗЗ $I_{\text{акт}}$; емкостная составляющая тока ОЗЗ, обусловленная ненулевой расстройкой, $I_{\text{рас}}$; остаточный ток ОЗЗ $I_{\text{ост}}$.

Значение активного тока ОЗЗ рассчитывалось по формуле:

$$I_{\text{акт}} = \frac{I_{\text{емк}}}{Q}$$

Значение тока ОЗЗ, обусловленного ненулевой расстройкой, рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{рас}} = I_{\text{емк}} - I_{\text{ДГР}} = V \cdot I_{\text{емк}}$$

где $I_{\text{ДГР}}$ – ток дугогасящего реактора, измеренный автоматикой управления ДГР.

Поскольку ток $I_{\text{рас}}$ носит реактивный характер, остаточный ток определяется как:

$$I_{\text{ост}} = \sqrt{I_{\text{акт}}^2 + I_{\text{рас}}^2}$$

Во всех выборках значения тока высокочастотных составляющих не превышали 5% относительно составляющих тока с частотой 50 Гц и поэтому в анализе не учитывались.

Характеристики полученной выборки представлены в табл. 1.

Гистограммы распределения токов, обусловленных ненулевой расстройкой и активной составляющей тока ОЗЗ, приведены соответственно на рис. 1 и 2.

Из табл. 1 и гистограммы рис. 1 видно, что медианное значение тока $I_{\text{рас}}$ недо- и перекомпенсации составляет 0,29 А. То есть половина всех секций имеет остаточный ток ОЗЗ, обусловленный неточностью настройки ДГР, меньше медианного.

Из гистограмм рис. 1 и 2 видно, что медианное значение тока $I_{\text{рас}}$ на 92% меньше, а среднее на 89% меньше таковых для активного тока $I_{\text{акт}}$. Следовательно, наибольшее влияние на остаточный ток $I_{\text{ост}}$ в месте ОЗЗ оказывает именно активный ток.

Таким образом, очевидно, что дальнейшая модернизация ДГР и автоматике управления ими не приведет к существенному уменьшению тока в месте ОЗЗ.

Неоднозначность процесса возникновения, горения и гашения дуги в электрических сетях не позволяет четко определить нижнюю границу тока устойчивого горения дуги. Поэтому обычно используется минимальное значение тока ОЗЗ в 5 А, фигурирующее в ПТЭ [1]. В то же время существуют исследования, которые показывают, что и при значительно меньших токах ОЗЗ высока вероятность устойчивого дугового замыкания. Например, в кабеле ААШВ при токе ОЗЗ, равном 2,5 А, на частоте 50 Гц дуга носит устойчивый характер [5].

На рис. 3 красным цветом показаны секции с остаточным током, превышающим значение 2,5 А. Как видно из гистограмм, 58% секций имеют остаточный ток, значения которого превышают порог устойчивого дугообразования 2,5 А.

В табл. 2 указаны характеристики новой выборки, полученной путем исключения секций, остаточный ток которых меньше 2,5 А. Данная выборка описывает только секции, которые предположительно нуждаются в дальнейшем снижении (компенсации) остаточного тока ОЗЗ.

Из табл. 2 видно, что медианное и среднее значения емкостного тока секций близки друг к другу и находятся в диапазоне 50–60 А. При этом стандартное отклонение емкостного тока составило 33,26 А, что означает большой разброс значений в выборке относительно среднего. Отсюда следует, что необходимость компенсации остаточного тока практически не зависит от значения емкостного тока секции. Например, минимальное

Александр Булычев,
д.т.н., профессор,
технический директор

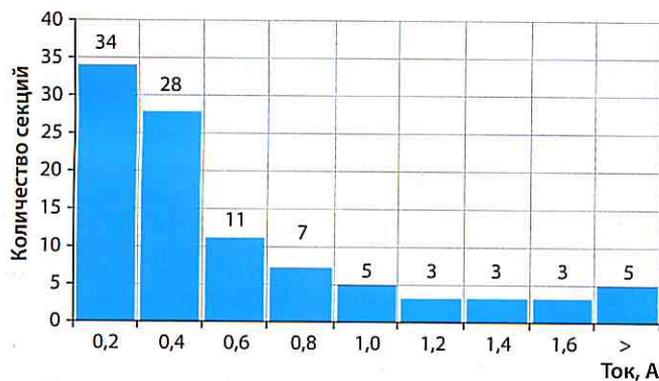
Юрий Дементий,
инженер

Владимир Козлов,
к.т.н., главный конструктор
ООО «НПП Бреслер»,
г. Чебоксары

• Таблица 1 Параметры выборки (общее количество элементов – 99) проведенного исследования параметров сети

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее значение	Медиана	Стандартное отклонение
$v, \%$	-0,59	3,32	-0,44	-0,48	3,32
Q	2,34	64,28	15,75	12,13	11,75
$I_{\text{емк}}, \text{A}$	7,90	149,00	45,80	36,00	31,06
$I_{\text{рас}}, \text{A}$	0,01	4,14	0,52	0,29	0,68
$I_{\text{ост}}, \text{A}$	0,24	25,05	4,91	3,57	5,06
$I_{\text{ост}}, \text{A}$	0,26	25,06	4,97	3,68	5,08

• Рис. 1 Гистограмма распределения тока $I_{\text{рас}}$ по секциям



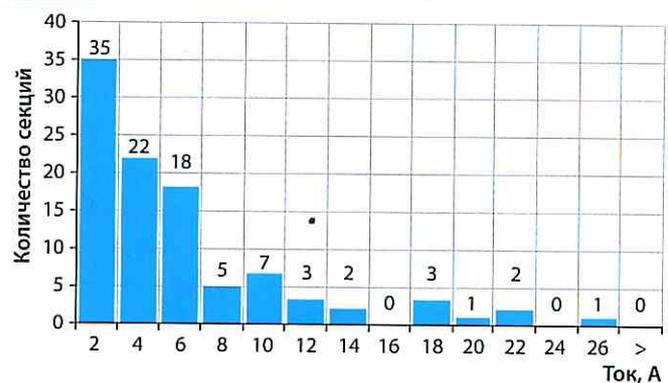
• Таблица 2 Выборка секций с остаточным током больше 2,5 А (общее количество элементов – 58)

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее значение	Медиана	Стандартное отклонение
Q	2,34	44,24	10,20	7,57	8,35
$I_{\text{емк}}, \text{A}$	7,90	149,00	58,52	55,65	33,26
$I_{\text{ост}}, \text{A}$	2,59	25,06	7,52	5,30	28,14

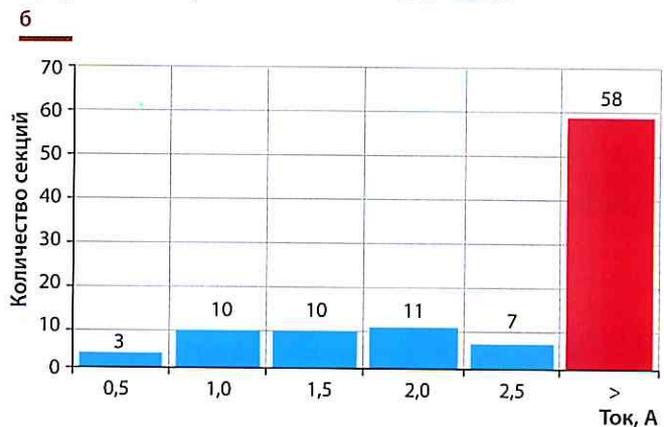
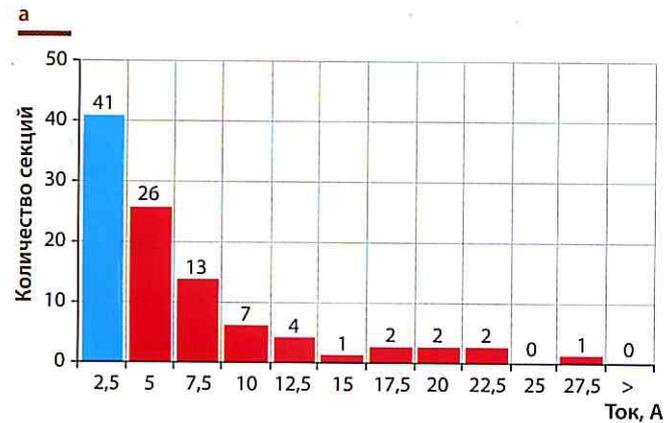
• Таблица 3 Доля остаточного тока относительно емкостного (общее количество элементов – 58)

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее значение	Медиана	Стандартное отклонение
$I_{\text{ост}}, \text{A}$	2,58	42,82	15,76	13,39	9,71

• Рис. 2 Гистограмма распределения тока $I_{\text{ост}}$ по секциям



• Рис. 3 Гистограмма распределения тока $I_{\text{ост}}$ по секциям: а) распределение секций с остаточным током > 2,5 А; б) распределение секций с остаточным током < 2,5 А



значение емкостного тока в данной выборке 7,9 А, при этом остаточный ток данной секции составил 2,67 А, то есть 34% от емкостного.

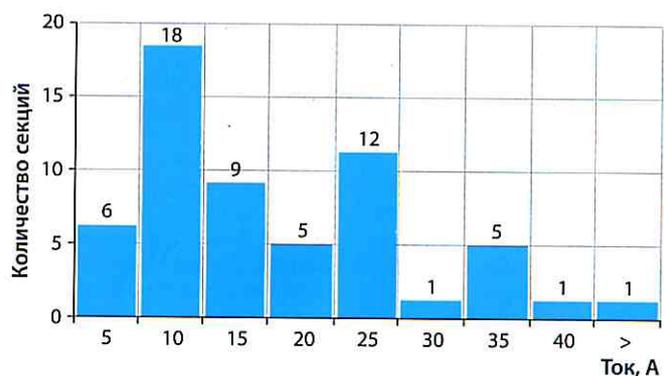
Доля остаточного тока относительно емкостного для секций с остаточным током, превышающим значение 2,5 А, определяется по формуле:

$$I_{\text{ост}}^* = \frac{I_{\text{ост}}}{I_{\text{емк}}} \cdot 100\%.$$

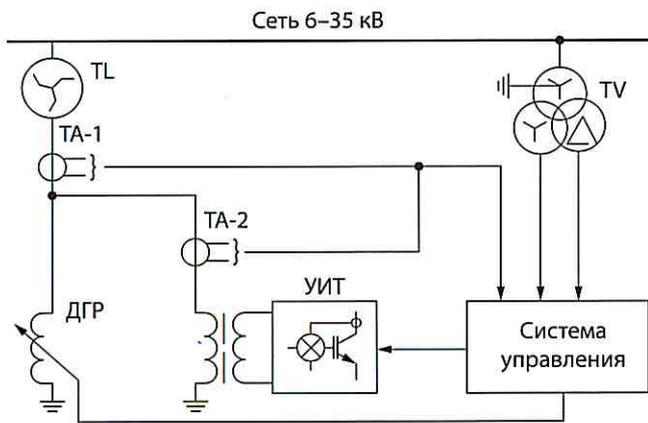
Для анализа данной величины можно использовать табл. 3 и гистограмму на рис. 4.

Табл. 3 показывает, что доля остаточного тока может достигать 42,82%. Это происходит в основном вследствие утечек в изоляции кабелей сети, активных потерь в ДГР, установки в нейтраль высоковольтного резистора (комбинированное заземление нейтрали) и т. д.

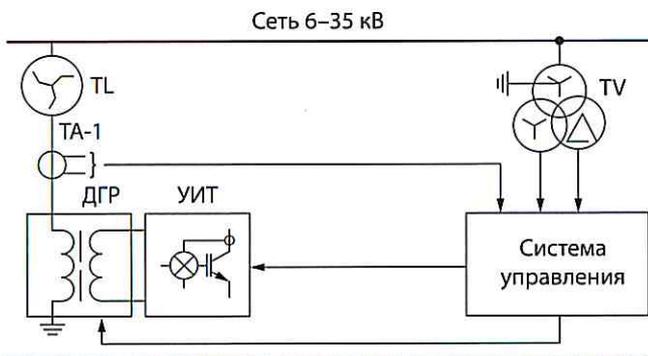
• Рис. 4 Гистограмма распределения $I_{\text{ост}}^*$ по секциям



• Рис. 5 Структурная схема системы компенсации остаточного тока



• Рис. 6 Структурная схема компенсации остаточного тока на основе ДГР с дополнительной обмоткой



ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ВЫВОДЫ

- По результатам статистического обзора можно сделать следующие выводы:
- Дальнейшее развитие ДГР и автоматики управления ими как самостоятельного средства компенсации малоэффективно. Необходимо создание и совершенствование устройств, позволяющих компенсировать остаточный ток ОЗЗ.
 - Наибольшее влияние на остаточный ток ОЗЗ оказывает активная составляющая, обусловленная активными потерями в сети, а не реактивная, вызванная неточной компенсацией.
 - Больше половины секций (58,6%) нуждаются в анализе эффективности работы дугогасящих устройств. На некоторых из них может потребоваться установка систем компенсации остаточного тока ОЗЗ.
 - Доля остаточного тока от емкостного ($I'_{ост}$) имеет большие значения со значительным разбросом и может достигать 42,82%. В связи с этим некорректно использовать значение емкостного тока в качестве основного параметра для принятия решения об установке в секции системы компенсации полного тока.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКТИВНЫХ УСТРОЙСТВ

Реальный эффект гашения электрической дуги при ОЗЗ в современных условиях в сетях с любыми параметрами можно получить лишь при использовании активных устройств, обеспечивающих компенсацию всех составляющих тока ОЗЗ на частоте сети и на других частотах, где содержится существенная энергия дуги. Система реализуется по комбинированной схеме, в которой компенсатор остаточного тока подключается в нейтраль параллельно ДГР (рис. 5).

Альтернативой является другой вариант компенсации, при котором компенсатор остаточного тока подключается к сети через дополнительную обмотку ДГР (рис. 6), что позволяет получить более компактное решение с одним силовым электромагнитным элементом – ДГР (без дополнительного трансформатора). Реакторы с дополнительной обмоткой для подключения активного компенсатора остаточного тока выпускаются в составе серии ДГР РДМК. Оба варианта реализации позволяют получить равноценные эффекты компенсации.

Компенсация емкостной (основной) составляющей тока ОЗЗ на частоте сети (50 Гц) осуществляется обычным пассивным ДГР, а все составляющие остаточного тока – активным управляемым источником тока (УИТ). В ряде случаев при модернизации существующей системы дугогашения решение с автономным компенсатором остаточного тока предпочтительнее, так как не требуется менять имеющиеся на подстанции ДГР.

Таким образом, при модернизации существующей системы дугогашения возможно исполнение компенсатора остаточного тока в виде отдельного устройства, согласованного с сетью при помощи высоковольтного трансформатора.

Работа компенсатора остаточного тока возможна в комплексе с дугогасящими реакторами ступенчатого, плунжерного или конденсаторного регулирования. При этом ДГР с конденсаторным регулированием [3] являются наиболее предпочтительным вариантом, поскольку они имеют:

- высокую скорость настройки реактора на резонанс токов с емкостью сети;
- высокую надежность вследствие отсутствия подвижных механических частей;
- возможность подключения компенсатора остаточного тока без согласующего трансформатора напрямую к низковольтной силовой обмотке реактора.

Система компенсации, построенная с использованием реактора РДМК-800/10,5, находится в опытной эксплуатации на действующей подстанции ПАО «МРСК Волги». Анализ результатов ее работы будет посвящена отдельная статья.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Больше половины действующих подстанций необходимо обследовать с целью оценки реальных параметров сети для анализа эффективности работы дугогасящих устройств и принятия решения о необходимости применения более совершенной компенсации, включающей остаточный ток.
2. Необходимость компенсации остаточного тока зависит от многих параметров конкретной сети, и некорректно делать выводы об эффективности гашения дуги с помощью ДГР только по значению компенсируемого им емкостного тока на частоте сети.
3. Реальный эффект гашения электрической дуги при ОЗЗ в современных условиях в сетях с любыми параметрами можно получить лишь при использовании активных устройств, обеспечивающих компенсацию всех составляющих тока ОЗЗ на частоте сети и на других частотах, где содержится существенная энергия дуги. Дальнейшая модернизация только пассивных методов и технических средств (обычных ДГР) не может дать существенного практического эффекта.
4. Наиболее перспективным направлением дальнейшего развития дугогасящих устройств является разработка активных систем компенсации остаточного тока ОЗЗ.
5. ДГР типа РДМК является наиболее подходящим типом реакторов как для компенсации емкостного тока, так и для работы в составе системы компенсации остаточного тока. Реакторы данного типа удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к ним действующими нормативными документами. Эффективность их работы подтверждена успешным многолетним опытом промышленной эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. СО 153-34.20.501-2003. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации.
2. Бульчев А.В., Дементий Ю.А., Козлов В.Н. Компенсация тока ОЗЗ в распределительных сетях 6–10 кВ. Новые технологии // Новости ЭлектроТехники. 2018. № 1(109). С. 28–30.
3. Бульчев А.В., Козлов В.Н., Салмин Н.О., Соловьев И.В. Дугогасящие реакторы с конденсаторным регулированием // Релейная защита и автоматизация. 2015. № 4.
4. Козлов В.Н., Бульчев А.В. Современная автоматика управления дугогасящими реакторами для компенсации емкостного тока замыкания на землю в сетях 6–35 кВ // Энергоэксперт. 2014. № 1. С. 38–43.
5. Дударев Л.Е., Запороженко С.И., Лукьянцев Н.М. и др. Дуговые замыкания на землю в кабельных сетях // Электрические станции. 1971. № 8.