

Продолжаем представлять новые исследования и разработки для защиты сетей от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ).

Традиционное решение с применением ДГР (катушек индуктивности), основанное на компенсации емкостной составляющей тока ОЗЗ, дает хорошие результаты только на одной частоте и при отсутствии существенных потерь. Новое решение, предложенное чебоксарскими разработчиками, предполагает компенсацию полного тока ОЗЗ.

КОМПЕНСАЦИЯ ТОКА ОЗЗ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–10 кВ Новые технологии

Задача снижения тока и гашения электрической дуги в месте однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) в сетях 6–35 кВ традиционно решается с помощью дугогасящих реакторов (катушек индуктивности), включаемых между нейтралью сети и землей [1]. Однако это элегантное решение, основанное на компенсации только емкостной составляющей тока ОЗЗ противоположно направленной индуктивной составляющей тока, создаваемой дугогасящим реактором (ДГР), дает хорошие практические результаты только на одной частоте и при отсутствии существенных потерь.

В реальных сетях, где токи ОЗЗ большие и превышают, например, 100 А, остаточный, не скомпенсированный ДГР ток в месте ОЗЗ, обусловленный потерями, гармониками и неидеальной настройкой ДГР, может превышать 5 А и поддерживать горение электрической дуги в месте ОЗЗ. Даже один фактор из перечисленных – расстройка ДГР (допускается 5% от номинального тока ДГР) может вызвать остаточный ток, способный поддерживать дугу в месте ОЗЗ.

Значение тока, при котором возможно устойчивое горение дуги в месте замыкания (5 А), определено в результате все-

сторонних исследований и зафиксировано в нормативных документах [2, 3, 4]. Таким образом, в сетях с током ОЗЗ 100 А и более ДГР не является гарантирующим средством гашения дуги, так как остаточный ток может превышать значение 5 А. Это означает, что ДГР большой мощности оказываются неэффективными, т. к. не выполняют в полной мере свою основную функцию гашения дуги в месте ОЗЗ.

ЗАЗЕМЛЕНИЕ С ФУНКЦИЕЙ КОМПЕНСАЦИИ

В сложившихся условиях поступательного развития сетей и увеличения токов ОЗЗ, для эффективного снижения тока до уровня ниже 5 А и гашения электрической дуги в месте ОЗЗ необходимо компенсировать не только емкостную составляющую тока ОЗЗ на частоте сети, но и полный ток ОЗЗ, включая активную составляющую и составляющие других частот. Кроме этого, необходимо поддерживать в месте повреждения условия, в которых невозможно повторное зажигание электрической дуги.

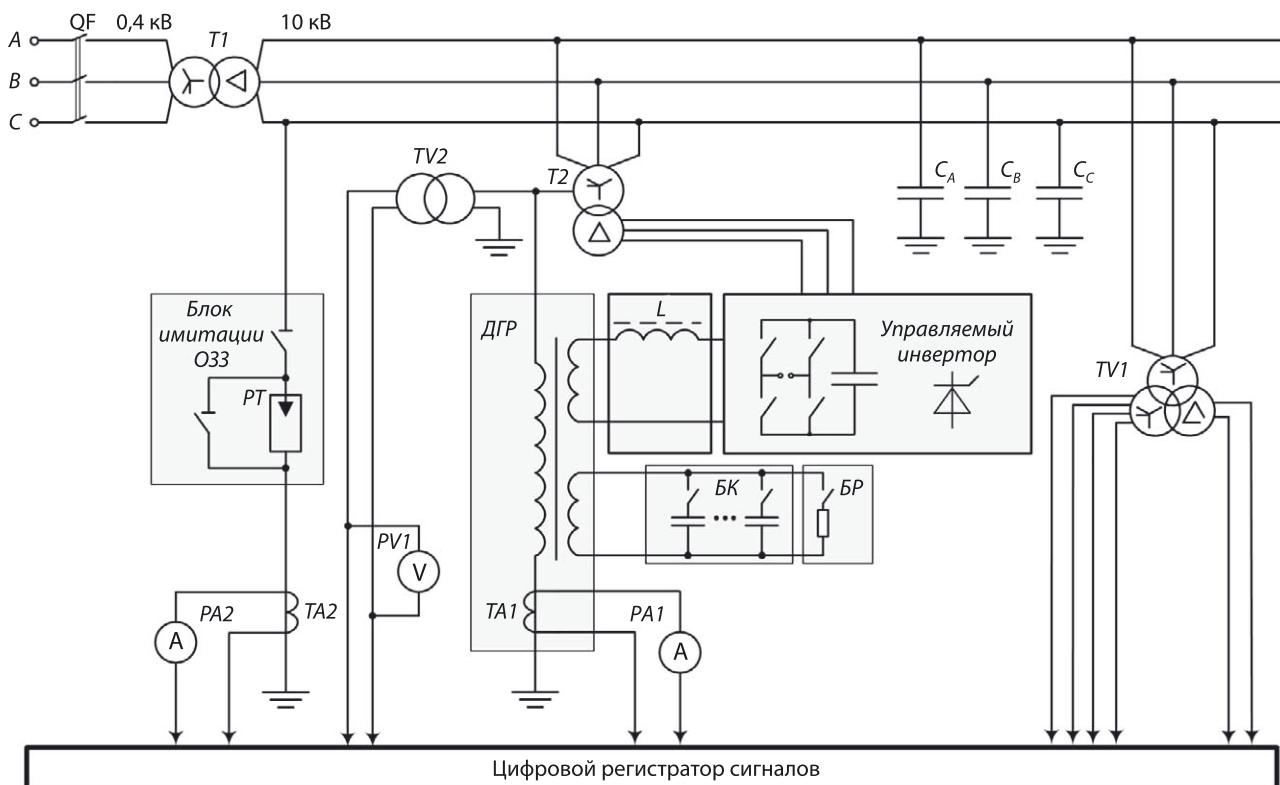
Практический интерес представляет решение, при котором остаточный ток (не скомпенсированный ДГР) компенсируется током специального управляемого источника и создаются

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

Юрий Дементий,
ведущий инженер

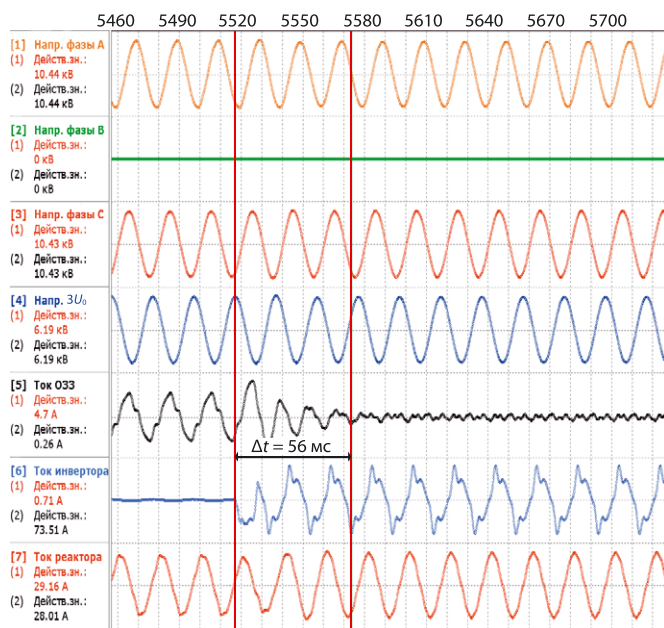
Владимир Козлов,
главный конструктор
ООО «НПП Бреслер», г. Чебоксары

• Рис. 1. Схема испытательной установки



Осциллограмма процессов при устойчивом ОЗЗ и активном характере остаточного тока

Рис. 2 •



условия для предотвращения повторного зажигания электрической дуги в месте ОЗЗ [5, 6]. Всё это реализовано в комплексе оборудования для управляемого заземления нейтрали, разработанном ООО «НПП Бреслер» в рамках НИОКР по заказу ПАО «МРСК Волги».

Было создано управляемое заземление нейтрали с функцией компенсации полного тока для сетей 6–10 кВ, обладающее новыми свойствами снижения тока и гашения электрической дуги в месте ОЗЗ, повышающее надежность и безопасность этих сетей. Решение дает возможность снижать ток в месте ОЗЗ до уровня, обеспечивающего гашение дуги, и создавать условия для предотвращения ее повторного зажигания.

В процессе разработки были созданы математическая и физическая модели управляемого заземления, доказано их соответствие реальному объекту. Всесторонние теоретические и экспериментальные исследования подтвердили правомочность принятых в процессе разработки ограничений и допущений, доказали работоспособность системы и позволили определить ее основные эксплуатационные параметры.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ КОМПЕНСАЦИИ

Модель сети (рис. 1) сформирована из элементов с сосредоточенными параметрами и работает на напряжении, соответствующем напряжению реальной сети 10 кВ. Она содержит повышающий трансформатор Т1 0,4/10 кВ, сосредоточенные емкости фаз сети относительно земли C_A , C_B , C_C , нейтралеобразующий трансформатор Т2, вторичная обмотка которого соединена по схеме «треугольник», и блок имитации ОЗЗ.

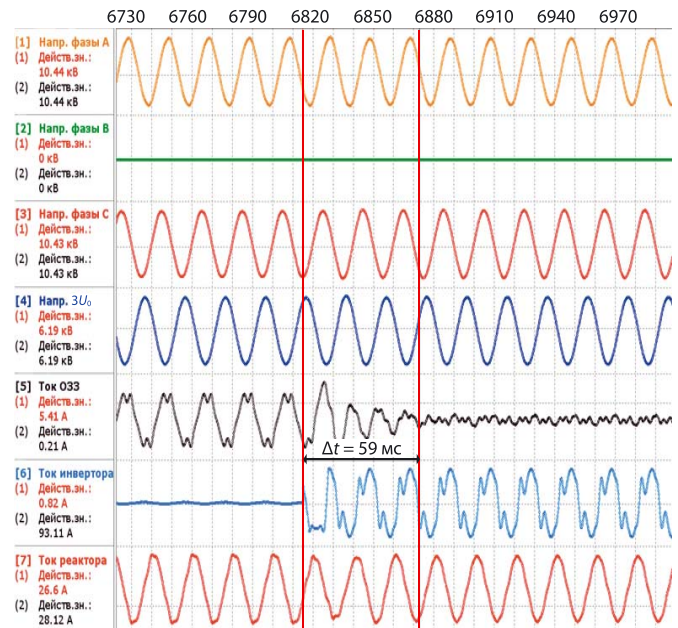
Предусмотрена возможность моделирования замыканий на землю с помощью разрядников двух видов – роговых и вращающихся, а также однополюсного разъединителя и отрезков высоковольтного кабеля с искусственно созданными дефектами изоляции.

Управляемое заземление нейтрали сети построено на основе специального ДГР с одной основной и двумя дополнительными обмотками. Основная обмотка ДГР включена между искусственной нулевой точкой сети, сформированной нейтралеобразующим трансформатором Т2, и землей. Первая дополнительная обмотка подключена к выходу управляемого инвертора через дроссель L, а вторая подключена к блоку конденсаторного регулирования БК и к блоку резисторов БР. Питание управляемого инвертора осуществляется от вторичной обмотки трансформатора Т2.

Для измерения электрических величин в модели сети использованы измерительные трансформаторы тока ТА1–ТА2, трансформаторы напряжения ТВ1–ТВ2 и показывающие измерительные приборы соответственно РА1–РА2 и PV1. Для получения осциллограмм процессов использован цифровой

Осциллограмма процессов при устойчивом ОЗЗ и емкостном характере остаточного тока

Рис. 3 •



регистратор сигналов, к входам которого подключены соответствующие вторичные цепи измерительных трансформаторов.

Программа экспериментальных исследований предусматривала проведение натурных ОЗЗ в физической модели сети и последующий анализ процессов при этих ОЗЗ.

Устойчивые металлические ОЗЗ реализовывались путем включения разъединителя, шунтирующего разрядник, в блоке имитации ОЗЗ. Дуговые ОЗЗ – с помощью разрядников при разомкнутом шунтирующем разъединителе.

Процессы организовывались по следующему алгоритму. Собирались электрические цепи, имитирующие определенный вид ОЗЗ. Подавалось питание на модель сети и управляемый инвертор. С помощью последовательного разъединителя к фазе модели сети подключался блок имитации ОЗЗ (тем самым создавалось искусственное ОЗЗ). Затем управляемое заземление начинало действовать по своим алгоритмам и таким образом осуществлялась компенсация тока ОЗЗ.

Статические погрешности компенсации полного тока оценены на основании опытов компенсации тока ОЗЗ при устойчивом металлическом замыкании на землю. В первом опыте (рис. 2) ДГР был настроен практически на резонансный режим (расстройка составляла $-0,2\%$), остаточный ток в месте замыкания (4,7 А) создавался в основном блоком резисторов, т. е. имел активный характер.

Во втором опыте остаточный ток (5,41 А) создавался расстройкой ДГР, которая составляла $+3,2\%$ (недокомпенсация), т. е. в основном имел емкостный характер.

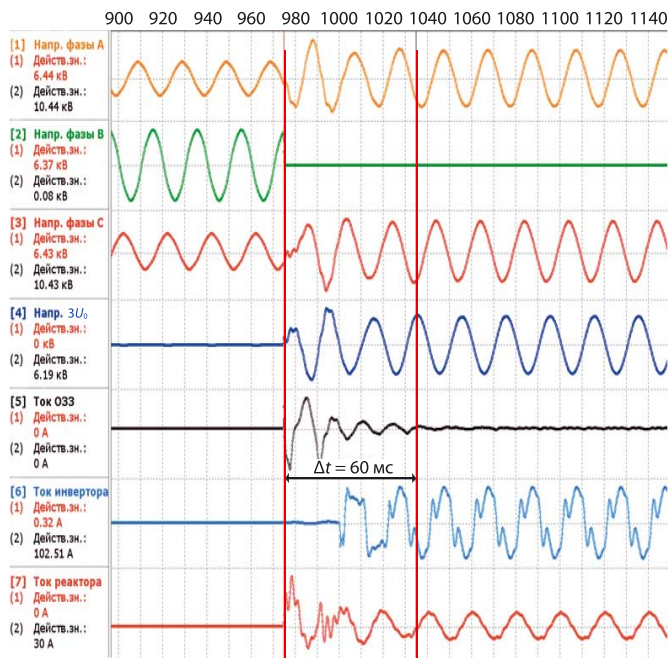
Цель создания остаточного тока в месте ОЗЗ различными способами – убедиться, что для системы компенсации не имеет значения причина появления остаточного (нескомпенсированного) тока и его характер. Коэффициент трансформации между основной первичной обмоткой и обмоткой ДГР, к которой подключен управляемый инвертор, равен 15.

Из первой осциллограммы (рис. 2) видно, что через 56 мс после включения системы компенсации (момент показан первой вертикальной указкой) действующее значение тока в месте повреждения уменьшилось в 18 раз: с 4,7 до 0,26 А (вторая указка). Таким образом, абсолютная величина статической погрешности составила 260 мА.

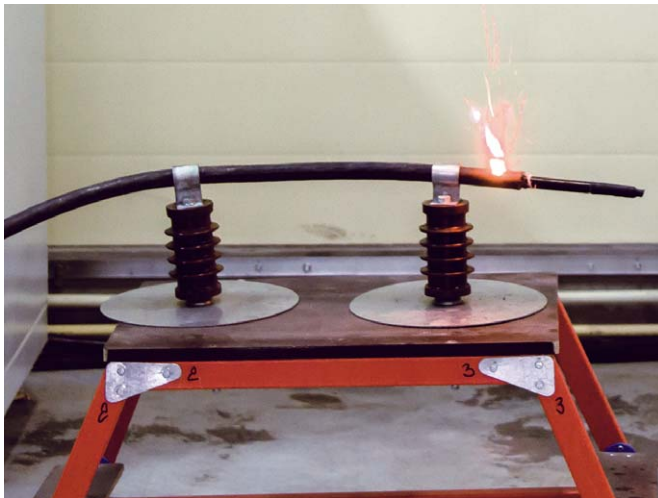
Во втором опыте (рис. 3) через 59 мс действующее значение тока в месте повреждения уменьшилось в 26 раз: с 5,41 до 0,21 А (вторая указка). Абсолютная величина статической погрешности в данном случае составила 210 мА.

Результаты, полученные при опыте металлического ОЗЗ, позволяют сделать вывод о том, что система устойчива, так как при начальном возмущении (включении системы) в регулируемом параметре (токе в месте повреждения) возникают

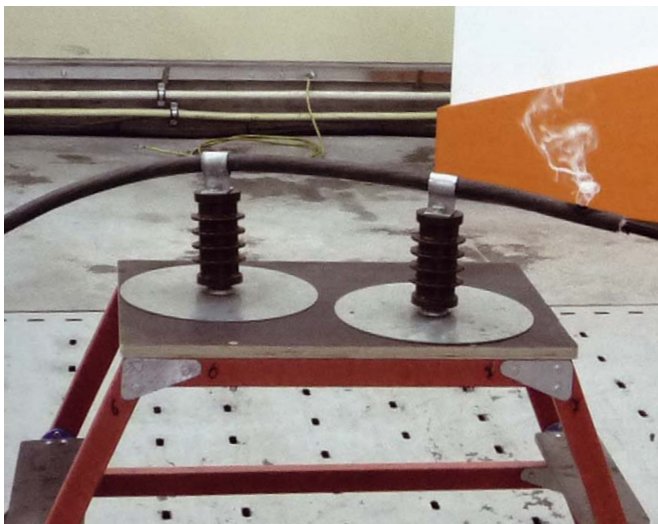
● **Рис. 4.** Осциллограмма процессов при дуговом ОЗЗ



● **Фото 1.** Дуговое ОЗЗ в кабеле со СПЭ-изоляции при компенсации тока ОЗЗ с помощью только ДГР с остаточным током 8 А



● **Фото 2.** Вид места ОЗЗ в кабеле после гасящего воздействия системы компенсации полного тока



колебания, имеющие затухающий характер. Остаточные колебания тока, которые видны на осциллограммах, обусловлены статической ошибкой регулирования и непрерывным (шумовым) входным воздействием.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Динамические свойства системы компенсации полного тока можно оценить на основании опытов дугового замыкания на землю (рис. 4).

Через 25 мс после возникновения замыкания включается инвертор и начинается процесс уменьшения тока в месте повреждения и гашения дуги. После включения инвертора за время, приблизительно равное одному периоду промышленной частоты, ток в месте повреждения практически прекращается вследствие полного гашения дуги и отсутствия условий для ее повторного зажигания в месте повреждения. С начала замыкания до полного гашения дуги проходит не более трех периодов колебаний промышленной частоты (60 мс).

Для предотвращения повторных электрических пробоев в месте повреждения система управления компенсацией поддерживает близкое к нулю значение напряжения поврежденной фазы относительно земли, создавая таким образом виртуальное замыкание на землю. Оно отличается от обычного ОЗЗ тем, что является полностью управляемым состоянием сети, вследствие чего ток в месте повреждения отсутствует.

Пределные динамические возможности управляемого заземления при использованных алгоритмах управления ограничены в основном физическими свойствами дуги и мало зависят от параметров системы компенсации. Таким образом, можно сделать вывод о том, что время гашения дуги в месте повреждения составляет не более трех периодов промышленной частоты.

Пределный ток, который остается нескомпенсированным, зависит от параметров основных силовых компонентов (инвертор и дугогасящий реактор) и чувствительности системы управления. Неидеальность преобразовательных трактов системы автоматического управления не позволяет установить высокий коэффициент обратной связи из-за риска возникновения автоколебаний, что является причиной ненулевой статической ошибки компенсации в режиме устойчивого замыкания.

Наглядное представление о работе управляемого заземления дают фотографии, полученные при проведении экспериментов с дуговыми ОЗЗ. На фото 1 – место ОЗЗ в кабеле в исходном состоянии при остаточном активно-емкостном токе ОЗЗ 8 А, когда компенсация осуществлялась только с помощью ДГР. На фото 2 – место ОЗЗ через 60 мс после начала действия системы гашения (компенсации) полного тока ОЗЗ.

Опытный образец управляемого заземления после испытаний и всесторонних исследований в заводских лабораторных условиях был введен в опытную эксплуатацию на действующей подстанции ПАО «МРСК Волги». В настоящий момент накоплен опыт эксплуатации системы в реальных условиях. Анализ работы опытного образца при реальных ОЗЗ подтвердил все основные параметры управляемого заземления, заданные при разработке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вильгейм Р., Уотерс М. Заземление нейтрали в высоковольтных системах. М.: Госэнергоиздат, 1959. 416 с.
2. Лихачев Ф.А. Инструкция по выбору, установке и эксплуатации дугогасящих катушек. М.: Энергия, 1971. 106 с.
3. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей: утв. Приказом Минэнерго России от 13 января 2003 г. № 6. М.: Энергосервис, 2003.
4. Сирота И.М., Кисленко С.Н., Михайлов А.М. Режимы нейтрали электрических сетей. Киев: Наукова Думка, 1985. 254 с.
5. Булычев А.В., Дементий Ю.А., Козлов В.Н. Экспериментальные исследования управляемого заземления нейтрали с функцией компенсации полного тока замыкания на землю в сетях 6–10 кВ // Релейная защита и автоматизация. 2017. № 4(29). С. 37–41.
6. Устройство для компенсации полного тока однофазного замыкания на землю: авторское свидетельство (СССР) № 813587; опубл. БИ № 10, 1981.