



Измерение частичных разрядов под рабочим напряжением в сетях с нейтрализатором замыкания на землю (GFN)

Malcolm SELTZER-GRANT
HVPD Ltd – UK
malcolm.seltzer-grant@hvpd.co.uk
Ross MACKINLAY
HVPD Ltd – UK
ross.mackinlay@hvpd.co.uk

Klaus WINTER
Swedish Neutral AB – Sweden
klaus.winter@swedishneutral.se
Lee RENFORTH
HVPD Ltd – UK
lee.renforth@hvpd.co.uk

Аннотация

На высоковольтных электрических сетях в качестве средства устранения токов замыкания на землю применяется методика управления напряжением и током нейтрали. Для достижения полной компенсации токов замыкания на землю используется современная силовая электроника, разработанная компанией Swedish Neutral. В нейтрализаторе замыкания на землю (GFN) для очень быстрого и полного устранения тока замыкания кроме традиционной технологии с катушкой Петерсена используется новейший компенсатор остаточного тока (RCC).

Подача с помощью этой системы напряжения на нейтраль трансформатора при нормальных условиях эксплуатации позволяет управлять фазным напряжением. В свою очередь, это позволяет гасить частичные разряды (PD) в кабелях и подключенном к нему оборудовании за счет повышения и понижения напряжения для каждой фазы. Это дает возможность иметь очень мощную диагностическую систему.

В статье представлены результаты тестирования частичных разрядов в режиме онлайн (OLPD) на высоковольтных сетях в сочетании со смещением напряжения нейтрали. Практические примеры представлены по результатам тестирования с искусственно созданными дефектами на двух высоковольтных сетях, как части ввода в эксплуатацию системы GFN.

Введение

Подача напряжения в нейтраль создает эффект смещения напряжения между фазой и землей, подаваемого на силовые кабели. В зависимости от величины напряжения и фазового угла, при которых смещается нейтраль, эквивалентное напряжение между определенной фазой и землей может быть доведено до нуля, в то время как между другими фазами и землей будет полное междуфазное напряжение.

Обнаружение частичного разряда позволяет локализовать места ухудшения изоляции системы. В случае высоковольтных сетей это необходимо для проведения технического обслуживания в зависимости от их состояния, планирования замены оборудования и повышения общей надежности.

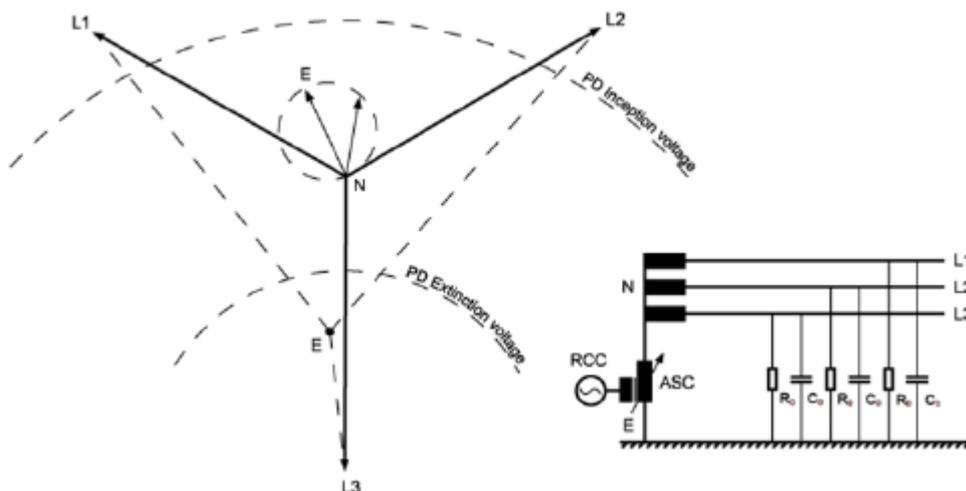
Технология обнаружения частичного разряда в режиме онлайн позволяет оценивать состояние при наличии рабочего напряжения нормальной частоты. Измерения частичных разрядов со смещением напряжения нейтрали представляет интерес, так как возможность снижать напряжение между фазой и землей может позволить устранять большие частичные разряды на одной фазе в режиме онлайн, например, при обнаружении увеличения частичных разрядов, указывающего на ухудшение состояния изоляции. При смещении нейтральной точки градиент напряжения на одной или двух фазах будет повышаться, с возможностью достижения напряжения возникновения частичного разряда на этих фазах. Это позволяет обнаруживать точку возникновения частичного разряда при напряжении нормальной рабочей частоты и способно помочь оператору сети в выявлении слабых мест при сохранении нормального процесса работы сети.

Нейтрализатор замыкания на землю (GFN)

Нейтрализатор замыкания на землю (GFN), изначально разработанный для решения проблемы с повторным возникновением повреждения кабеля в резонансных заземленных сетях, в сочетании с онлайн-мониторингом частичного разряда дает пользователям мощный инструмент для мониторинга изоляции электрической сети и доаварийной защиты. С помощью подачи напряжения/тока в нейтраль GFN управляет фазным напряжением и, при необходимости, быстро гасит частичный разряд,



предотвращая тем самым его дальнейшее развитие в полный пробой диэлектрика, смотрите рисунок 1 [1].



PD inception voltage	Напряжение возникновения частичного разряда
PD extinction voltage	Напряжение гашения частичного разряда

Рисунок 1: Гашение частичного разряда путем управления потенциалом земли (E).

Кроме того, при полном управлении фазным напряжением также используются новейшие методы онлайн-тестирования частичного разряда на уровнях выше нормального рабочего напряжения, что позволяет внедрять стратегии систематического раннего выявления дефектных компонентов системы. И все это происходит без какого-либо влияния на подачу питания конечным пользователям.

Нейтрализатор замыкания на землю, как правило, подключается к нейтрали силового трансформатора (обмотка с соединением по схеме «звезда», Y-обмотка) или к отдельному заземляющему трансформатору (обмотка, соединенная зигзагом, Z-обмотка). Законченная система GFN состоит из современных дугогасительных катушек со сплошным сердечником (ASC, смотрите рисунок 2), шкафа с силовой электроникой для подачи напряжения/тока (RCC – компенсатор остаточного тока) и шкафа управления GFN. Кроме управления подачей напряжения/тока RCC система GFN также обеспечивает автоматическую перенастройку дугогасительной катушки и имеет новый двойной прибор обнаружения мест повреждения с превосходными возможностями поиска. Путем замыкания фидера на дальнем конце можно получить информацию о расстоянии до места повреждения.



Рисунок 2: Современная быстро настраиваемая дугогасительная катушка со сплошным сердечником (справа на фотографии) образует высоковольтную часть системы GFN.

Дугогасительная катушка образует параллельный резонансный контур с емкостной утечкой (C_0) между фазой и землей. С этим резонансным контуром импеданс источника для замыкания на землю одной фазы повышается в 10 – 20 раз, то есть достаточно для гашения однофазного искрового замыкания на

воздушных силовых линиях. Однако неисправности, связанные с переломом линии и деревьями, и устойчивые неисправности других типов, а также все типы кабельных повреждений все еще не могут быть устранены полностью. Вместо этого необходимо ехать к поврежденному фидеру для сведения к минимуму риска возгорания и травм людей из-за оставшегося активного тока.

Теперь быструю и полную компенсацию всех остаточных токов замыкания на землю – как основных, так и гармоник – обеспечивает нейтрализатор замыкания на землю GFN, который подает в нейтраль ток в противофазе. Это дает большое преимущество, особенно в промышленных и городских кабельных сетях, где почти все кабельные неисправности начинаются с однофазного замыкания на землю (экран кабеля). При отсутствии правильной компенсации подобное повреждение кабеля быстро развивается в многофазную или перекрестную неисправность с последующим долгосрочным отключением.

Кроме того, GFN обеспечивает превосходную защиту в отношении личной и противопожарной безопасности [2]. «Перехват» неисправности за менее чем три цикла на практике никогда не может быть получен за счет использования традиционных схем защиты, в которых используются автоматические выключатели.

Обнаружение и мониторинг частичного разряда в режиме онлайн (OLPD)

В режиме онлайн измерение частичного разряда выполняется в виде кратковременных спот-тестов или с использованием непрерывного мониторинга в течение длительного периода, как правило, от 24 часов до постоянного мониторинга. После первого обнаружения частичного разряда можно найти его местоположение в кабеле. Затем эта информация используется для технического обслуживания и для определения тяжести повреждения, так как различные компоненты кабельной системы имеют различные допуски по частичному разряду; например, кабельные принадлежности часто более устойчивы к частичному разряду, чем изоляция кабелей. На рисунке 3 показана блок-схема, отражающая различные аспекты обнаружения частичного разряда в режиме онлайн.

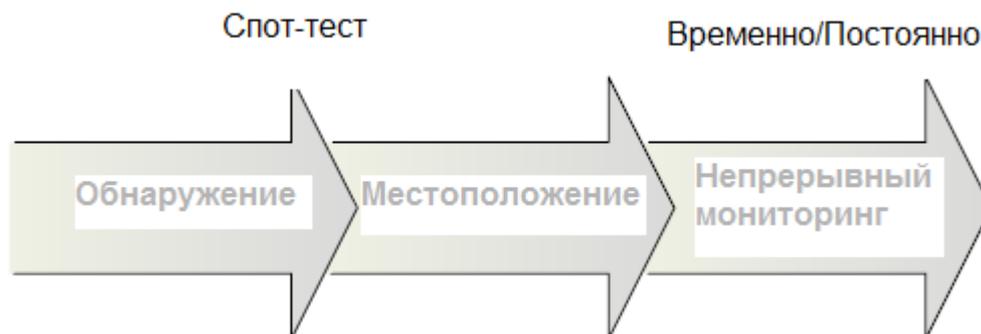


Рисунок 3: Аспекты обнаружения частичного разряда в режиме онлайн

Оборудование для измерения частичного разряда в режиме онлайн

Для измерений использовалась измерительная система HVPD-Longshot. Она включает в себя широкополосный осциллограф с частотой дискретизации 100 миллионов выборок в секунду (MS/s). Встроенное программное обеспечение анализа частичного разряда захватывает и обрабатывает данные одного цикла питания. Программа разделяет частичный разряд и шумы с помощью распознавания событий частичного разряда на основе формы сигнала [3]. Прибор запускается с помощью сигнала электропитания, что позволяет синхронизировать сигналы частичного разряда с напряжением, подаваемым в тестируемый кабель.

Блок-схема системы показана на рисунке 4. Для временного или постоянного мониторинга используется одинаковое оборудование с добавлением на входах мультиплексоров для максимального увеличения количества датчиков, которые можно подключить к одной системе.

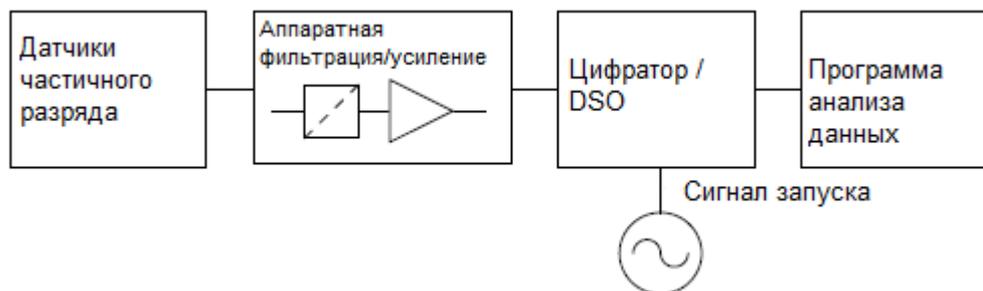


Рисунок 4: Система измерения частичного разряда в режиме онлайн

Подключение датчиков OLPD

В данной работе для обнаружения импульсов тока от частичных разрядов в кабелях и распределительных устройствах использовались не мешающие нормальной работе системы высокочастотные трансформаторы тока (НФСТ). Датчики НФСТ можно закреплять на заземлении кабеля или кабеле с заземлением оболочки. Примеры подсоединения датчиков показаны на рисунке 5.



Рисунок 5: Примеры подсоединения датчиков НФСТ.

Обнаружение частичного разряда со смещением напряжения нейтрали

Подача напряжения в нейтраль создает эффект смещения фазного напряжения, подаваемого в силовые кабели. В зависимости от фазового угла смещения нейтрали эквивалентное фазное напряжение можно свести к нулю, в то время как полное междуфазное напряжение будет прилагаться между другими фазами и землей.

Измерения частичного разряда на сетях с системами RCC GFN представляют интерес в качестве возможности снижения фазного напряжения, которое может позволить в режиме онлайн погасить большой частичный разряд на одной фазе, например, в случае обнаружения повышения уровня частичного разряда, указывающего на ухудшение состояния изоляции. Когда точка нейтрали смещается, на одной или двух фазах напряжение увеличивается с возможностью достижения напряжения возникновения частичного разряда на этих фазах, смотрите рисунок 1.

Также на этих сетях следует провести измерение частичного разряда, чтобы убедиться в отсутствии значительного роста уровня частичного разряда и отсутствии новых частичных разрядов, возникающих из-за использования смещения напряжения нейтрали для гашения частичного разряда или, что более вероятно, при использовании по прямому назначению для защиты от замыкания на землю.



Практический пример 1: Сеть 30 кВ

Измерения частичного разряда на сети 30 кВ проводились с помощью установленной системы GFN. К фазе L2 секции резервного распределительного устройства на 10 панели подстанции AIS был подсоединен образец кабеля XLPE (с изоляцией из сшитого полиэтилена) с недостаточным снятием напряжения на концевой заделке. К фазам L1 и L3 этой секции не были подключены никакие кабели. Установка для тестирования показана на рисунке 6.

Недостаточное снятие напряжения на концевой заделке кабеля приводит к возникновению поверхностных разрядов, которые во время измерения используются в качестве сигнала частичного разряда. На рисунке 7 вместе с подробной информацией о формах импульсов частичного разряда для положительного и отрицательного полупериода показан цикл питания, захваченный датчиком HFCT при 30 кВ.



Рисунок 6: Испытательная установка с образцом кабеля

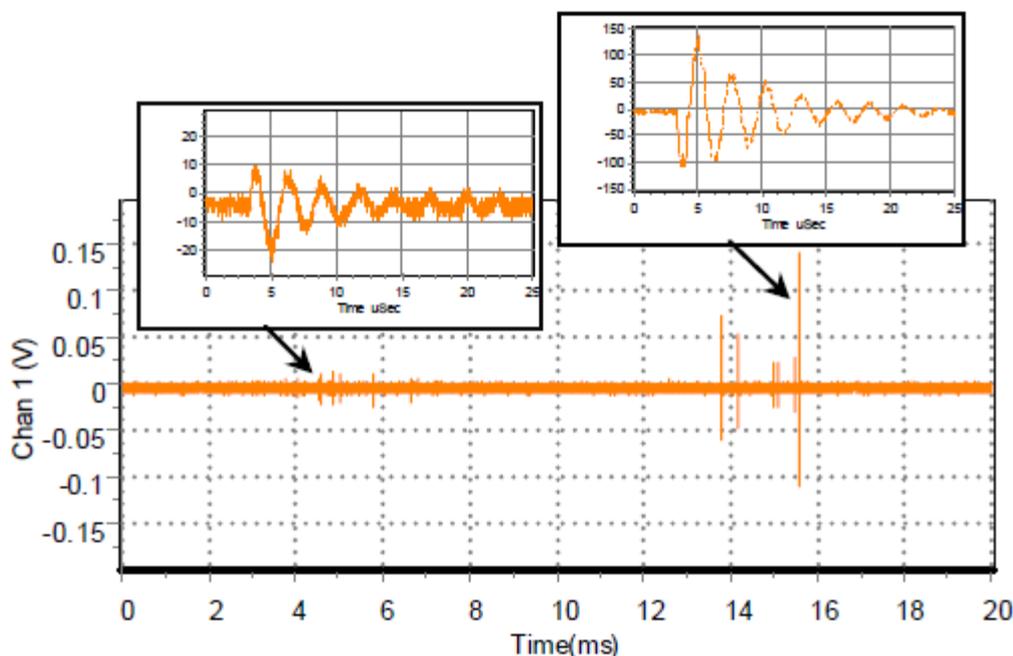
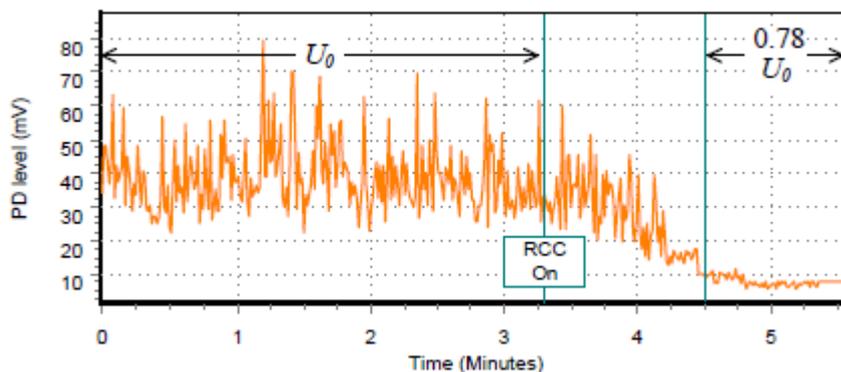


Рисунок 7: Характеристика фазы частичного разряда и формы импульсных сигналов (на врезках).

Chan 1 (V)	Канал 1 (В)
Time (ms)	Время (мс)
Time (uSec)	Время (мкс)

Для снижения напряжения на фазе L2 использовалось смещение напряжения нейтрали. На рисунке 8 показано снижение со временем пикового сигнала частичного разряда по мере снижения напряжения на фазе L2 с U_0 до $0,78U_0$. Следует отметить, что в этот момент напряжение на фазах L1 и L3 было повышено до $1,12U_0$. Как и ожидалось, снижение подаваемого напряжения позволило погасить активность частичного разряда на образце кабеля на фазе L2, причем частичный разряд перестает наблюдаться на $0,78U_0$.

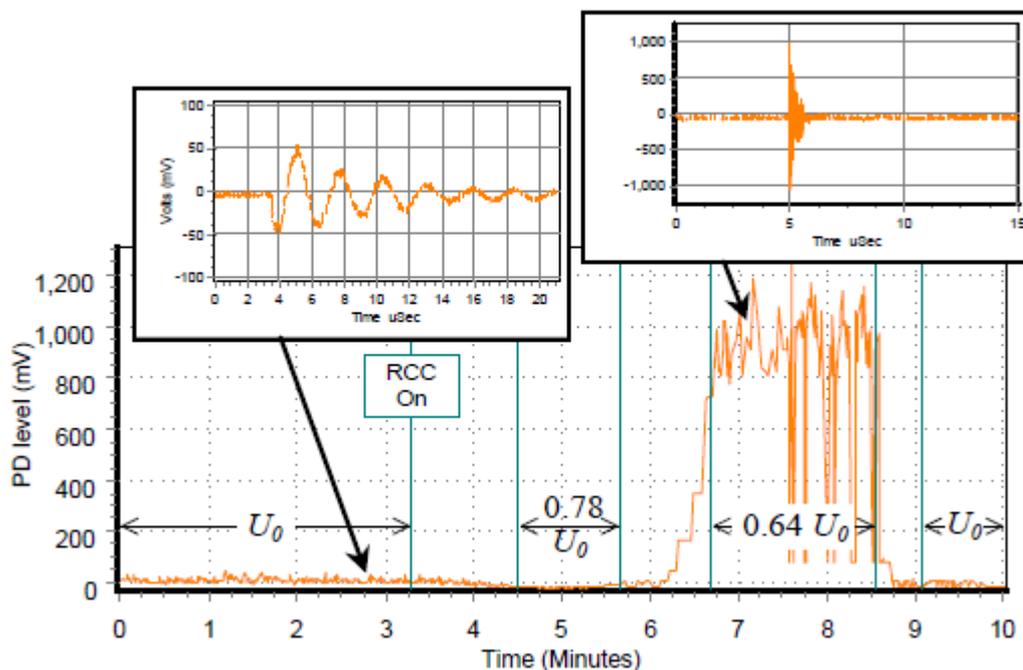


PD level (mV)	Уровень частичного разряда (мВ)
RCC On	Включение RCC
Time (Minutes)	Время (в минутах)

Рисунок 8: Изменение частичного разряда во времени с понижением U_0 .

Напряжение на фазе L2 понижалось и далее до $0,64U_0$, что привело к повышению фазного напряжения на фазах L1 и L3 до $1,22U_0$. Результирующую пиковую активность частичного разряда во времени можно увидеть на рисунке 9. На рисунке видно, что при дальнейшем снижении уровня напряжения повышается активность частичного разряда на фазе L2. Форма импульсов частичного разряда, показанная на врезках на рисунке 9, заметно отличается для фазы L2 от тех, которые были при напряжении U_0 и $<U_0$. Так как частичный разряд на фазе L2 уже погашен при напряжении $0,78U_0$, предполагается, что частичный разряд при более низких напряжениях ($<0,78U_0$) является перекрестным влиянием фаз L1 и L3 на соседние цепи.

Импульсные сигналы на $0,64U_0$ имеют большую высокочастотную составляющую, что указывает на расположение источника сигнала рядом с датчиком. Визуальный осмотр и акустическое тестирование частичного разряда на панели распределительного устройства позволило выявить некоторые повреждения вводов водой, что и было признано вероятным источником (смотрите рисунок 10).



PD level (mV)	Уровень частичного разряда (мВ)
Time (uSec)	Время (мкс)
RCC On	Включение RCC
Time (Minutes)	Время (в минутах)

Рисунок 9: Изменение частичного разряда во времени и формы импульсных сигналов (на врезках) с понижением U_0 .

Тесты не только показали размер и исчезновение частичного разряда в режиме онлайн, но также и выявили появление частичных разрядов на других фазах, где их обычно нет при напряжении U_0 . Это дает значительные преимущества во время проведения тестирования сетей при вводе в эксплуатацию, а также при обычной оценке линий.

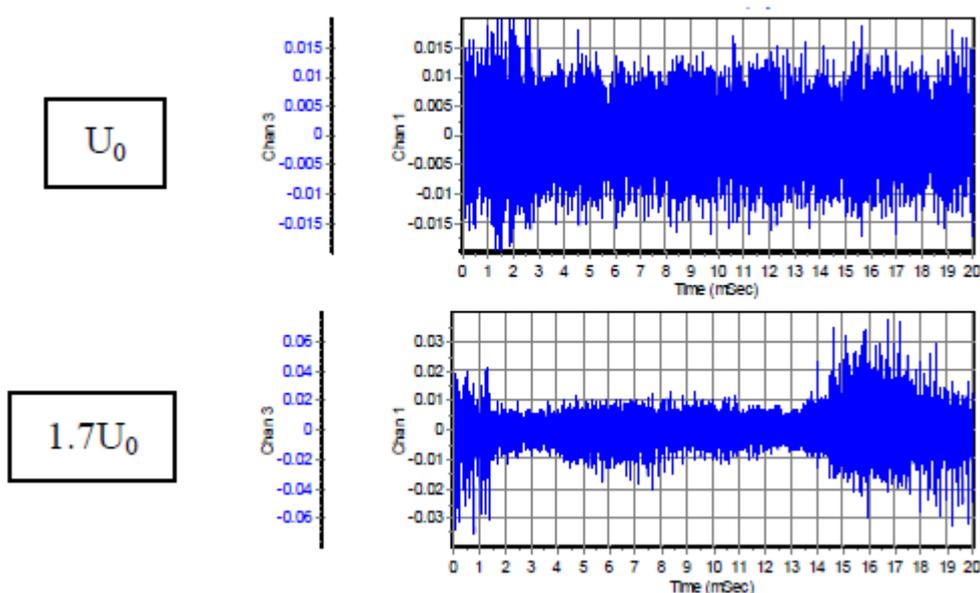


Рисунок 10 Доказательства попадания воды на вводах распределительного устройства.

Практический пример 2: Сеть 20 кВ

Измерения частичного разряда со смещением напряжения нейтрали проводились во время ввода в эксплуатации системы GFN на подстанции 20 кВ. При смещении точки нейтрали к фазе L1 и повышении напряжения на фазах L2 и L3 на фазе L2 наблюдался частичный разряд до 1600 пКл, который отсутствовал при напряжении U_0 . Фазовые характеристики до и после смещения напряжения нейтрали показаны на рисунке 11. В этом случае пять месяцев спустя на линии была обнаружена неисправность,

что указывает на возможность использования измерений для получения предварительного предупреждения о слабых местах на сети.



Chan 1 (3)	Канал 1 (3)
Time (mSec)	Время (мс)

Рисунок 11: Характеристика частичного разряда фазы L2 при U_0 и $1,7U_0$.

Практический пример 3: Ввод в эксплуатацию GFN 11 кВ

Тестирование частичного разряда были проведены в рамках процедуры ввода в эксплуатацию новой установленной системы GFN на подстанции на пять фидеров 11 кВ. С использованием смещения нейтрали каждая фаза была протестирована с U_0 , 1,3, 1,5 и $1,73U_0$ между фазой и землей. Измерения частичного разряда проводились как на основной подстанции, так и на распределенных точках на сети. Никаких существенных изменений уровня частичного разряда при увеличении напряжения на каждой фазе не наблюдалось, что указывает на хорошее состояние сети.

Выводы

Смещение напряжения нейтрали в прошлом обычно использовалось как часть схемы защиты от замыкания на землю. Измерялась возможность погасить частичный разряд в режиме онлайн за счет смещения напряжения нейтрали (и последующего снижения фазного напряжения на одной фазе). Также было показано начало частичного разряда. Будущее приложение могло бы объединять смещение напряжения нейтрали с постоянным мониторингом частичного разряда, и смещать точку нейтрали при наблюдении роста частичного разряда и достижения определенного уровня его гашения. Базовые тесты частичного разряда полезны для обнаружения частичного разряда, возникающего при повышении напряжения между любой фазой и землей, что может произойти при эксплуатации системы со смещением напряжения нейтрали.