

Постоянный мониторинг ЧР генераторов: интеллектуальное управление сигналами тревоги

M. Tozzi, A. Salsi, M. Busi, *Techimp HQ Srl*, G. C. Montanari, A. Cavallini, *University of Bologna*, B. Wright and P. Hart, *Jubatus Pty Ltd*

Аннотация - системы постоянного мониторинга частичных разрядов (ЧРМ) были установлены на нескольких генераторах в Южной Америке в последние два года, в рамках долгосрочного проекта, направленного на мониторинг большого количества машин, расположенных на различных станциях. Все подразделения ЧРМ автоматически отправляют данные и сигналы тревоги на центральный блок (ЦБ) расположенный в центре управления электростанциями. Датчики Частичного Разряда (ЧР) установлены на каждой машине и характеризуются ультра широкой полосой пропускания (УШП), и таким образом, они способны записать всю форму волны импульсов ЧР. Разделение на группы от разных источников осуществляется с помощью частотно-временных (ЧВ) карт. После разделения различных источников, можно настраивать надлежащим образом логические сигналы тревоги для каждого источника ЧР без влияния сетевых помех и шумов. Кроме того, различные критерии могут быть использованы для оценки тенденции развития ЧР в зависимости от природы источника ЧР (ПИЧР), например, в микропустах изоляции, поверхностный ЧР в пазу (между изоляцией катушки и железом статора), расслоение изоляции, разряды между стержнями (лобовая часть), отслоение изоляции от ВЛ проводника, искрение между изоляцией катушки и стяжными элементами железа статора при выходе обмотки из паза. В конце концов, активность различных ЧР возникающих в одной и той же фазе можно рассматривать отдельно, избегая ложных тревог от суммирования статистических параметров всех источников ЧР.

Термины — Частичные разряды, Генератор, On-line, Управление ресурсами, ЧВ-карта, ПИЧР диаграмма.

I. Введение

В соответствии с докладами NERC [1], величина недопоставленной энергии составляет от 50 до 700 МВт в случае повреждения изоляции обмотки генератора в зависимости от типа и номинальной мощности генератора. Одно это (без учёта затрат на ремонт) оправдывает усилия направленные на предотвращение сбоев с использованием передовых диагностических инструментов. В последние годы была проделана большая работа по развитию и совершенствованию системы диагностики частичного разряда, которая может работать online (online измерения и мониторинг являются лучшим выбором для оценки актуального состояния, так как они стоят меньше, чем offline испытания и предоставляют достоверную картину природы ЧР во время работы генератора). Однако, для большинства систем доступных на рынке, оценка состояния изоляции в значительной степени зависит от субъективного мнения эксперта. Это связано с тем фактом, что образцы ЧР предоставляемые этими системами не разделяются в зависимости от различных источников. Более того, высоко амплитудные явления, которые не представляют непосредственную угрозу изоляции могут часто обнаруживаться во вращающихся машинах (например, поверхностные ЧР из-за влаги или грязи в машинах с воздушным охлаждением), такие системы склонны к срабатыванию ложной тревоги или к игнорированию надвигающейся аварии. Эта статья предоставляет результаты, полученные путём измерения

ЧР, которые подходят для решения вышеуказанных проблем, обеспечивая оптимальное решение для диагностики. Эта диагностика опирается на передовое оборудование, программное обеспечение и средства связи и прекрасно вписывается в систему Smart Grid. Эффективность системы демонстрируется показом тематического исследования, при котором любая другая система диагностики, не способная разделить представленный ЧР по источникам, приведёт к ложным выводам.

II. АРХИТЕКТУРА МОНИТОРИНГА ЧР

Тестируемый генератор оснащён тремя элементами ёмкостной связи (один на каждую фазу) постоянно подсоединёнными к шинам генератора, как показано на рис.1. Следует отметить, что импульсы ЧР подвержены сильному затуханию когда распространяются вдоль обмотки и могут появиться на детекторе со спектральными компонентами лежащими в диапазоне низких частот (< 5 МГц). По этой причине значение 1 нФ было выбрано для ёмкостных конденсаторов. Эти датчики ведут себя как фильтры с частотой среза около 1 МГц, что позволяет обнаружить с хорошей SNR (Signal Noise Rate - отношение полезного сигнала к шуму) сигналы ЧР, приходящие от источников расположенных внутри обмотки вдалеке от датчика. Напротив, конденсаторы, со значением ёмкости <100 пФ имеют частоту среза значительно выше (в диапазоне от десятков МГц), таким образом, они чувствительны только к импульсам ЧР с высокочастотной составляющей, т.е. приходящих от источников близких к датчику (ЧР в лобовой части обмотки, коронный разряд, поверхностные ЧР).

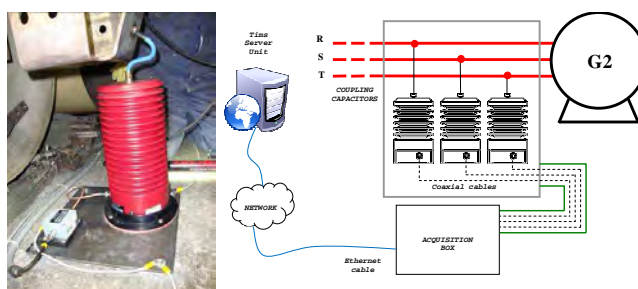


Рис. 1. Изображение установки ёмкостного конденсатора 1 нФ на шине генератора (слева) и схема подключения (справа).

Конденсаторы подключены к коробке с защитой IP65 рядом с машиной, содержащей модуль сбора ЧР (МСЧР), снабжённый питанием и защитой, Ethernet коммутатором и коробкой вывода, которые позволят выделить высокочастотный сигнал ЧР из синхронизированного опорного напряжения (60 Гц). МСЧР представляется как ультра широко полосный (УШП) датчик имеющий широту пропускания между 16 кГц и 30 МГц и способен записывать спектр импульсов ЧР, для производства передового статистического анализа на основе формы импульса.

Связь между модулем сбора данных и центральным модулем (ЦМ) осуществляется через модем. Данные полученные МСЧР временно сохраняются на флеш памяти и автоматически отправляются каждые 2 часа в ЦБ расположенный в центре сбора SCADA. Для того чтобы предоставить данные операторам, расположенным вдали от установки, ЦБ организован как показано на рис.2.

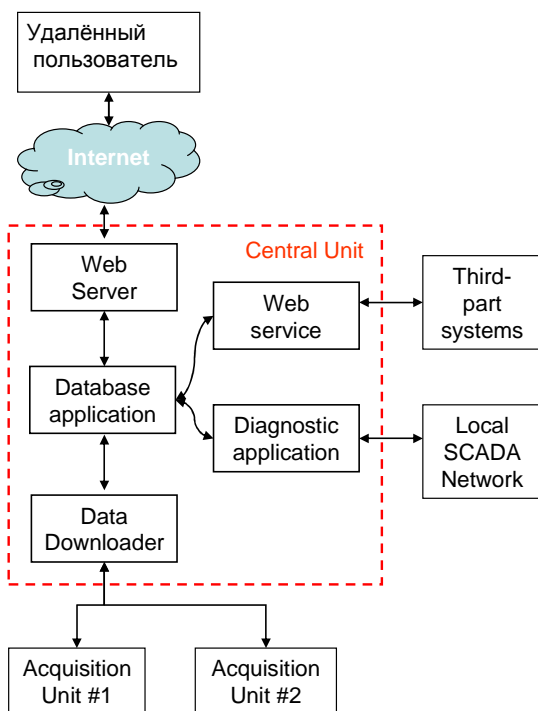


Рис.2. Центральный блок мониторинга Smart Grid PD. Основные функциональные блоки

Каждый блок в ЦБ кратко объясняется следующим:

- **Web server (веб сервер):** Веб-сервер позволяет взаимодействовать удалённым пользователям с активами базы данных через интернет. Это предполагает, что прямой доступ к серверам Structured Query Language (SQL) (или любой другой сервер базы данных) может быть использован чтобы позволить пользователям запрашивать базу данных. Однако, при использовании веб сервера только часть программного обеспечения необходима чтобы отображать данные через удалённый компьютер - это обычный браузер, который облегчает доступ к данным (ограничение сложности запросов). Веб сервер позволяет отображать данные в простой форме, с помощью обзорных карт как, например на рис.3 для диагностируемого генератора.
- **Web Service (веб служба):** это приложение обеспечивает уровни интерфейса между веб сервером, базой данных и третьей частью системного мониторинга (если таковая имеется). Это позволяет сохранённой информации в главной базе данных быть полученной через стандартные протоколы для обмена структурированной информацией (например, простой протокол доступа к объектам, SOAP). Эта функция может быть использована для сложных запросов пользователей, которым предоставляется полный доступ к базе данных.

- **Data Downloader (загрузчик данных):** управляет автоматическими подключениями и обменом данными между удалёнными устройствами сбора и ЦБ. Это включает в себя конфигурацию удалённого прибора и хранения данных в главной базе данных.
- **Database (база данных):** это обеспечивает хранение данных и управление со сложными запросами
- **Diagnostic application (диагностическое приложение):** это обработка уровня архитектуры, отвечает за извлечение информации из исходных данных и, в случае активации сигнальных флагов, даёт возможность отправки сигналов тревоги через email и/или SMS.
- **Control and supervision architecture (архитектура контроля и надзора)** (не показано на рис.2): он выступает в качестве сторожевого сигнализатора для всей системы, сигнализируя центры SCADA о любых аппаратных/программных аномалиях.



Fig. 3. Обзорный экран показывающий состояние тестируемого генератора

III. Устройство тревоги

Ядром системы PDM является инструмент Устройства Тревоги (УТ), способный подавать сигнал тревоги без учёта влияния внешних источников или от смешанных сигналов и, таким образом, не создавая ложные положительные сигналы тревоги. Действительно, логика УТ основана на трёх важных функциях, описанных ниже.

А. Карта Временно-Частотного (ВЧ) разделения

Во вращающихся машинах проявляется большое количество ЧР, имеющих различную природу происхождения, которые могут быть активны одновременно. Все импульсы ЧР, поступающие из этих источников, а также импульсы, поступающие от шума и внешних источников возмущения, должны быть разделены на различные кластеры, чтобы проанализировать все источники в отдельности.

$$\begin{cases} \tilde{s}(t) = s(t) / \sqrt{\int_0^L s(\tau)^2 d\tau} \\ t_0 = \int_0^L t \tilde{s}(t)^2 dt \\ T = \sqrt{\int_0^L (t - t_0)^2 \tilde{s}(t)^2 dt} \\ F = \sqrt{\int_0^\infty f^2 |\tilde{S}(f)|^2 df} \end{cases} \quad (1)$$

Действительно, каждый кластер включает импульсы, имеющие форму волны со схожими чертами и, следовательно, должны приходить из одного и того же источника. Эффективным инструментом является так называемая ЧВ-карта [2], предоставляющая два параметра для каждого записанного импульса: эквивалент времени, T , эквивалент частоты, F (ширина частотного спектра), вычисляемого как показано на (1), будучи записанный импульс $s(t)$, t время, L продолжительность наблюдаемой диаграммы и $\tilde{s}(f)$ преобразование Фурье нормализованного импульса ЧР (евклидова норма =1). Количества t и f это постоянные интегрирования во временной и частотной области. Пример заполнения алгоритма ВЧ карты показан на рис.4, где фаза с разделёнными частичными разрядами (ФРЧР) относится к n -line испытанию ЧР на генераторе 13кВ показана вместе с соответствующей ЧВ-картой. Обратите внимание, что пять различных кластеров могут быть нанесены на карту, которые имеют различную природу происхождения.

После разделения каждый кластер может быть легко идентифицирован при помощи книги [3], автоматических средств идентификации [4-5] или личного опыта.

Возможные источники:

- Фоновый шум (шум окружающей среды, не коррелирует с напряжением переменного тока)
- Помехи (связаны с напряжением: IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors-Биполярный транзистор с изолированным затвором), внешняя корона, ЧР происходящие в других активах связанных с сетью)
- ЧР происходят внутри машины (из-за микропустот, отслоений, пазовые разряды, множественные полости, между фазными стержнями в лобовой части обмотки, расслоение изоляции, и т.д.)

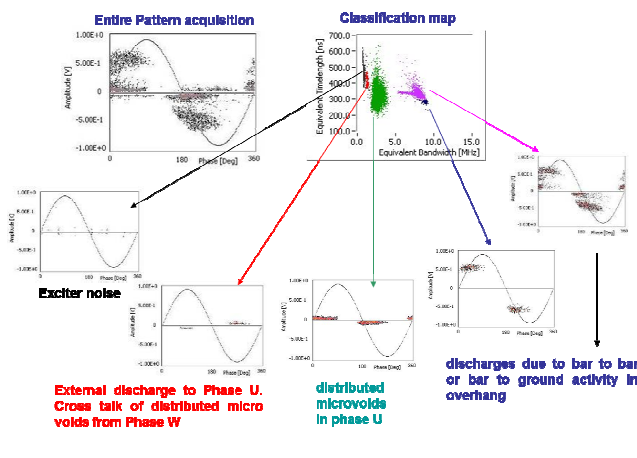


Рис. 4. образец ФРЧР и ЧВ-карта относящиеся к диагностике ЧР on-line на одной фазе генератора. Пять подклассов полученных после применения алгоритма разделения ЧВ-карты, обозначены разными цветами: возбудитель шума (чёрный), помехи (красный), ЧР из-за пустот (голубой) и межфазный (синий)

Важность такого разделения и идентификации процессов заключается в необходимости:

1. Оценивание состояния изоляции машины эффективно: так как не все дефекты имеют одинаковую скорость развития деградации и вредность (пазовый разряд с такой же амплитудой как и амплитуда при отслоении может привести к гораздо более высокой деградации изоляции)
2. Настройка логики сигнализации только на дефекты внутри машины, будучи не подверженной влиянию внешних возмущений или шума.

В. Алгоритмы сигнализации тревоги, связанные с ЧВ-картой

Новшество системы мониторинга описанной здесь заключается в возможности ассоциировать настроенные пороговые уровни и разную логику тревоги на каждом кластере, имеющих отношение к ЧР внутри машины. Три основных диагностических индекса рассчитывается для каждого кластера:

- Q_{max} : 95-ый перцентиль (95% значений ниже Q_{max}) распределения амплитуды [мВ]
- N_s : количество записанных импульсов в секунду [Гц]
- R_{N_s} : соотношение между средней N_s оценивается в течение определённого интервала времени (часов, дней, месяцев в зависимости от природы ЧР, условий эксплуатации и других факторов) и N_s в предыдущем временном интервале.

Такие значения должны быть рассчитаны для каждого источника ЧР и сравнены с соответствующими пороговыми уровнями:

- $T_{y_{Q_{max}}}$: Q_{max} пороговый уровень
- $T_{y_{N_s}}$: N_s пороговый уровень
- $R_{y_{N_s}}$: пороговый уровень для N_s роста

Такие уровни выбираются с учётом типа источника ЧР и граничных условий, как например, изоляционный материал, система охлаждения, возраст машины, условия эксплуатации, история аварий и т.д. и могут меняться в каждом конкретном случае.

Когда один из порогов превышен, необязательно что сигнал тревоги не подан. В самом деле, в некоторых случаях два или больше параметров (или логический элемент) должны измениться вместе, чтобы изменить состояние (с зелёного на жёлтый или с жёлтого на красный) тогда как в других случаях достаточно единственного изменения одного из параметров (или логический элемент), в очередной раз в зависимости от природы ЧР или граничных условий.

В качестве примера: изменения скорости повторения в переменном напряжении ЧР может быть достаточно, чтобы изменить состояние (например, с зелёного на жёлтый) в то время как изменение N_s и Q_{max} вероятны при распределённых микропустотах.

После того как пороговые уровни и сигнационные логики выбраны для конкретной машины, работающей при известных условиях, то они могут быть применены к каждой группе ЧВ-карты.

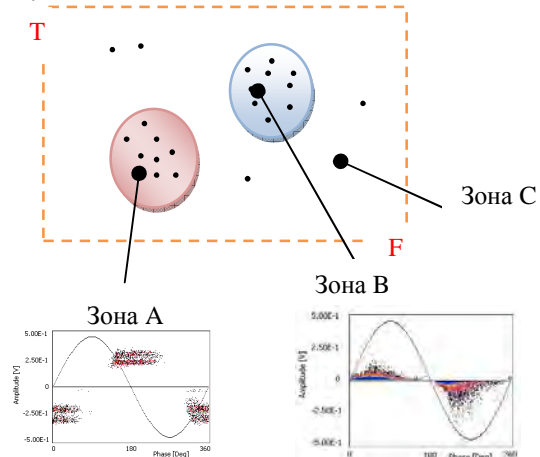


Рис. 5. Различные логические схемы и пороговые значения могут быть обращены к различным областям ЧВ-карты.

Рисунок 5 очерчивает простой пример где три области могут быть индивидуализированы на ВЧ карте: *зона А* имеет отношение к межфазному ЧР в лобовой части обмотки, *зона В* имеет отношение к расслоению изоляции и *зона С* содержит все другие источники распространения на карте, характерные для шума и помех. Эти три области должны быть связаны с разными логическими схемами: для *зоны А* большее значение должно придаваться изменению N_s , так как межфазный ЧР может быть вредным без существенного изменения амплитуды. *И наоборот*, для *зоны В* важнее проанализировать изменение Q_{max} , так как амплитуда может значительно меняться в течение деградации изоляции при расслоении на плоские полости. Наконец, простая логика, основанная только на пороговых уровнях Q_{max} , может быть использована для *зоны С* где нет ЧР. Если что-то меняется в *зоне С*, аврийный сигнал подаётся только для предупреждения оператора. Тогда оператор проверит систему, находясь в центре управления, и применит к *зоне С* наиболее подходящую логическую схему для целей оценки тенденции, если новое явление признаётся в качестве ЧР.

С. Указатели сигнализации

PDM система использует простую логику светофора, чтобы показать состояние машины:

- Зелёный свет подаётся когда либо нет ЧР внутри машины во время мониторинга или когда записанные ЧР рассматриваются как не вредные. Действительно, ЧР из-за распределённых микропор, расслоения и межфазные ЧР могут быть активны в течение всего расчётного срока службы машины, не приводя к критическим условиям
- Жёлтый цвет подаётся, когда активность ЧР обращена к явлению, характеризующемуся как правило быстрой скоростью деградации или активность ЧР представляет значения N_s или Q_{max} потенциально опасными, но тенденция постоянна или меняется медленно.
- Красный цвет указывает, что вероятность аварии в машине может быть высокой, предполагает остановку генератора и визуальный осмотр и/или техническое обслуживание. Важно отметить, что условия эксплуатации чрезвычайно важно влияют на состояние изоляции машины. Это значит, что красный цвет указывает на высокую вероятность аварии если условия эксплуатации значительно не меняются.

IV. Результаты ON LINE ЧР мониторинга

Данные показанные в этом разделе относятся к 13 кВ генератору с воздушным охлаждением при диагностике в течение одного месяца. Сигналы тревоги, поданные системой PDM показаны на обзорном рис.3: есть две фазы генератора с жёлтым цветом сигнализации (фаза S и T) в то время как одна фаза с зелёным цветом сигнализации (R). Мы обратим внимание на фазу S.

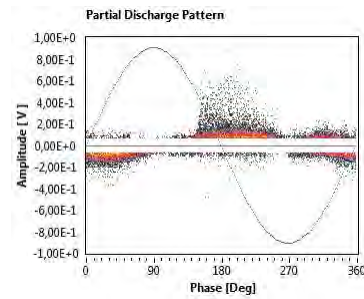


Рис. 6. Образец целой фазы с разделёнными частичными разрядами (ФРЧР), относящейся к фазе S, указывающий на присутствие ЧР из-за пазовых ЧР.

Вся картина относящаяся к фазе S показана на рис. 6. Эта модель является ассиметричной, с преобладанием в отрицательном полупериоде, с резким наклоном, треугольной формы, что характерно для пазового ЧР[3]. Это явление может быть критически значительным, если параметры Q_{max} и N_s меняются с течением времени. Для такого вида дефектов и машины следующие пороги основанные на величинах Q_{max} и N_s были выбраны производителем системы PDM в соответствии потребительскими свойствами:

- $T_{y_{Q_{max}}}$ (от жёлтого до красного) = 0.5 V
- $T_{y_{N_s}}$ (от жёлтого до красного) = 1000 Hz (импульсов в секунду)

Обратите внимание, что условия с зелёным цветом не рассматриваются как пазовый ЧР, будучи очень критичным условием: пороги устанавливаются только между жёлтым и красным цветами тревоги. Рисунок 7 показывает тенденцию изменения Q_{max} во времени. Видно, что амплитуда ЧР устойчива, довольно ниже порогового уровня (500 mV). Таким образом, только одна Q_{max} могла уже указывать на жёлтое состояние, но частота повторения очень важна для такого рода дефектов, которая означает, что или высокая величина частоты повторения или быстрое изменение тенденции могут изменить сигнал тревоги с жёлтого на красный, даже если Q_{max} ниже порогового значения. В качестве демонстрации рисунок 8 показывает, что N_s относящийся к этому образцу увеличивается в течение периода мониторинга до значения выше 10000 импульсов в секунду и, таким образом, превышает выбранный пороговый уровень для условий красного сигнала.

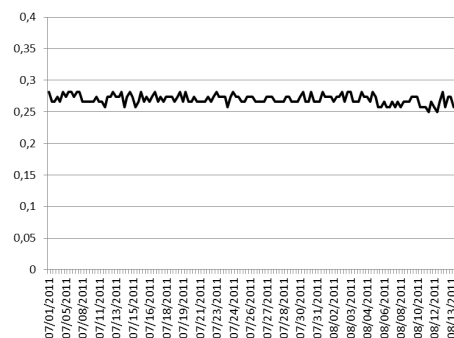


Рис. 7. Тенденция Q_{max} (в Вольтах) по времени в процессе диагностики для всего образца ФРЧР записанного в фазе S (пазовый ЧР).

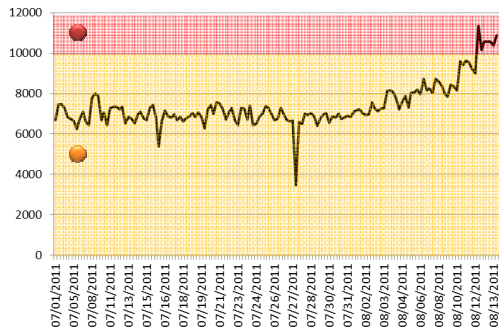


Рис. 8. Тенденция N_s (в Гц) по времени в процессе диагностики для целого образца ФРЧР записанного в фазе S (пазовый ЧР).

Таким образом, из этих первых анализов можно предположить, что пазовый ЧР в фазе S ухудшает изоляцию, помещая генератор в красную зону, так что нужно остановить машину для технического обслуживания.

Так или иначе, есть важная вещь, которую мы пропустили в этом анализе - это исследование ЧВ-карты, имеющей отношение к рассматриваемому образцу ФРЧР. По сути картины ФРЧР, показанной на рис.6, кажется совершенно очевидно, что присутствует только одна ЧР активность, но, если мы рассмотрим ЧВ-карту показанную на рис.9, мы можем легко понять, что присутствуют два разных кластера, которые могут быть легко разделены (отмечены красным и синим). Так, мы можем построить шаблон ФРЧР, имеющий отношение к обоим классам, и увидеть, что фактически присутствуют две структуры обусловленные расслоением ЧР, что означает, что есть два дефекта возникающие одновременно в одной и той же фазе.

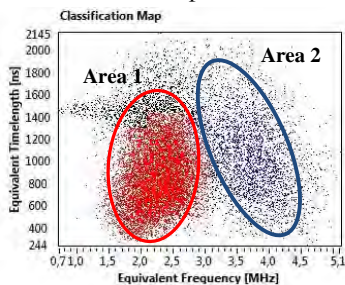


Рис. 9. ЧВ-карта имеющая отношение к целому шаблону ФРЧР фазы S, указывающая на присутствие двух разных кластеров.

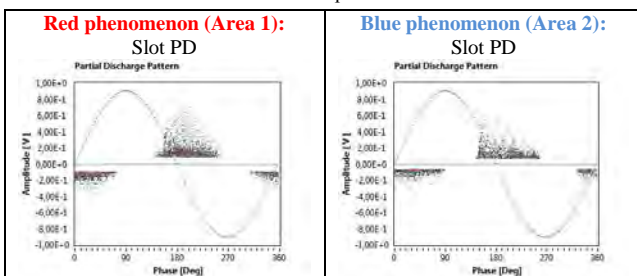


Рис. 10. Шаблоны ФРЧР имеющие отношение к двум кластерам, обнаруженным в ВЧ карте.

Польза от такого разделения является выдающейся, если мы теперь посмотрим на две имеющиеся тенденции раздельно. В то время как тенденции Q_{max} этих двух ЧР похожи (Рис. 11) по этому целому шаблону (Рис. 7), то тенденции N_s значительно различаются (Рис. 12).

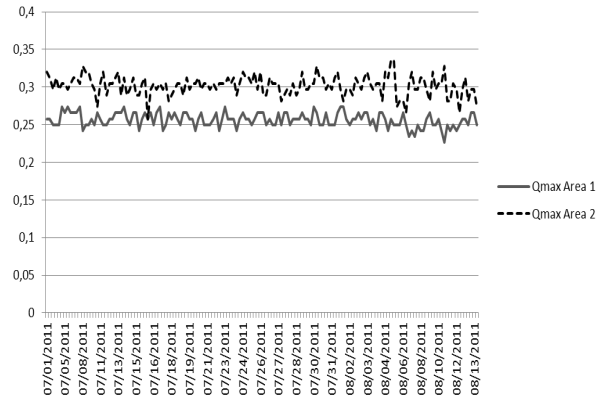


Рис. 11. Тренд Q_{max} (в Вольтах) во времени для обоих явлений пазовых ЧР в фазе S.

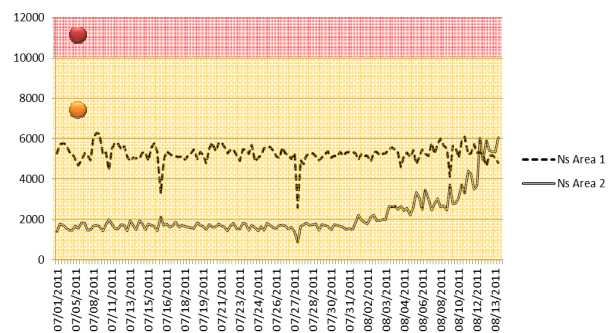


Рис. 12. Тренд N_s (в Гц) во времени для обоих явлений пазовых ЧР в фазе S. Оба ЧР имеют величины ниже уровня красного порога, в зоне жёлтого сигнала тревоги.

В самом деле, оба явления имеют частоту повторения, которая значительно ниже, чем порог между жёлтым и красным условиями. Это значит, что фаза S находится при жёлтом условии, и что результат, который мы получили ранее (красный сигнал тревоги) был некорректным. На самом деле факт в том, что первоначальный результат был суммой повторяющихся частот двух различных источников в одной фазе, вероятнее всего расположенных в двух разных точках. Заметим вторую важную вещь, что изменение тенденции N_s на рис. 8 было дано как изменение тенденции ЧР расслоения в зоне 2, то есть один с более высокой эквивалентной частотой и более низкой начальной частотой повторения. Быстрый рост такого ЧР вероятнее всего обусловлен или очень ранней стадией или возможным близким расположением к лобовым частям обмотки, таким образом в районе с более высоким электрическим полем к земле.

V. Заключение

Инновационные особенности системы постоянного мониторинга ЧР для высоковольтных машин описаны в этой статье. В частности, было исследовано применение индивидуальной логики сигнализации для каждого источника ЧР внутри испытываемого оборудования. Действительно, было показано, что источники имеющие аналогичную картину (пазовый ЧР в случае описанном здесь) и происходящие одновременно в различных частях одной и той же фазы, могут быть ошибочно диагностированы, если эффективный инструмент диагностики не применяется перед установкой диагностических сигналов тревоги.

VI. ИСТОЧНИКИ

В статье показан реальный случай, иллюстрирующий, что комбинация обеих амплитуд и частоты повторения записанного ЧР может выдать по ошибке критическую ситуацию (красный сигнал тревоги), исходя из которой необходимо произвести техническое обслуживание. В действительности, используя ЧВ-карту как инструмент разделения, возможно понять, что фактически было два похожих ЧР (пазовый ЧР) в одной и той же фазе, и что оба явления не были такими критичными (условие жёлтого сигнала), если их изучать отдельно, в результате нет необходимости в техническом обслуживании. Таким образом, прежде чем давать заключение по результатам диагностики, необходимо разделить все источники и исследовать их по отдельности. Надлежащие алгоритмы настроенные на оба типа источника ЧР и надлежащие граничные условия (условия эксплуатации, тип изоляции машины, возраст машины и ряд других факторов) следует направлять на каждое явление в целях обеспечения эффективной оценки изоляции и вероятности отказа.

- [1] NERC Generating Availability Data System (GADS) workgroup, 2006-2010 Generating Availability Report, freely available at <http://www.nerc.com/>.
- [2] A. Cavallini, A. Contin, G. C. Montanari and F. Puletti, "Advanced PD inference in on-field measurements. I. Noise rejection", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 10, pp. 216 - 224, 2003.
- [3] A. Contin, A. Cavallini, G.C. Montanari, G. Pasini, F. Puletti, "Digital detection and fuzzy classification of partial discharge signals", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 9, No. 3, pp. 335-348, 2002.
- [4] A. Contin, A. Cavallini, G.C. Montanari, "A novel technique for the identification of defects in stator bar insulation systems by partial discharge measurements" ISEI, Anaheim, CA, USA, April 2-5, 2000, pp 501-505
- [5] C. Hudon, M. Belec, M. Levesque, "Study of slot partial discharges in air-cooled generators" IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 15, N. 6, pp. 1675-1690, 2008.

350005, РФ, г.Краснодар, ул.Кореновская 12, офис 17

Тел./факс: (861) 258-33-61

Эл.почта: inbox@rusiris-group.ru

Сайт: www.rusiris-group.ru. <http://exdi.su/>

