



AUMENTO DA CONFIABILIDADE OPERACIONAL ATRAVÉS DO MONITORAMENTO DAS DESCARGAS PARCIAIS NO ENROLAMENTO DE ESTATOR

Wojciech Koltunowicz, Laurentiu-Viorel Badicu e Ulrike Broniecki

OMICRON ENERGY SOLUTIONS GmbH, Alemanha

Erick Silva

Marcus Eugênio de Almeida

OMICRON electronics Corp. USA POLUX Tecnologia em Equipamentos Ltda

RESUMO

Neste artigo são apresentados os desafios na aplicação de monitoramento contínuo de descargas parciais (PDA) em máquinas rotativas. Um versátil sistema de monitoramento de descargas parciais, que pode ser aplicado para diferentes máquinas e pode ser conectado a uma vasta gama de sensores, é descrito. A experiência adquirida com o monitoramento PD para avaliar a condição da isolação do enrolamento do estator de turbo e hidro geradores é mostrada nesse artigo. É mostrada ainda a vantagem de se ter um sistema completamente digital, cujas configurações podem ser facilmente ajustadas remotamente. São apresentadas também características avançadas para separação dos sinais de ruído e de descargas parciais, baseado em uma técnica multicanal síncrona. São incluídos estudos de casos, que indicam que defeitos críticos podem ser detectados ainda em estágio inicial, possibilitando que sua evolução seja monitorada.

PALAVRAS-CHAVE

Máquinas rotativas, isolamento de estator, medições de descarga parcial, monitoramento

1. INTRODUÇÃO

Atualmente o monitoramento de descargas parciais (PDA) é um método aceito em todo o mundo para avaliação das condições do isolamento do estator. Diferentes soluções para sensores e técnicas de aquisição têm sido recomendadas, aplicadas e ultimamente reconhecidas por organismos técnicos internacionais [1-2]. Portanto há uma necessidade forte de um sistema de monitoramento PD versátil, que possa ser aplicado em diferentes tipos de máquinas rotativas e que possa ser conectado a uma ampla gama de sensores PD. Além disso, esse sistema deve ser capaz de prover toda a informação solicitada em documentos internacionais relevantes. A sensibilidade de medições PD em campo é fortemente limitada pelo alto nível de ruído. Os sistemas recomendados devem prover hardware e software capazes de reduzir a influência dos ruídos nos resultados do teste. Técnicas multicanal e multiespectral são utilizadas para aumentar a sensibilidade das medições PD [3]. Os estudos de caso descritos neste artigo mostram que defeitos incipientes podem ser detectados e sua evolução pode ser monitorada.

2. METODOLOGIA

2.1 Conceito de Sistema de Monitoramento

A grande parte dos defeitos de isolamento se desenvolve ao longo da vida da máquina rotativa. A fim de detectar tais mudanças ainda em um estágio inicial, é necessário se ter informação detalhada sobre a condição real do isolamento. Essa informação pode ser obtida pelo monitoramento PD durante a operação do ativo.

Conseqüentemente, o monitoramento contínuo de descargas parciais é uma ferramenta essencial para uma adequada gestão da manutenção, a fim de garantir um alto nível de confiabilidade do ativo [4].

2.2 Arquitetura de Servidor e Software

Os sinais dos sensores que detectam descargas parciais são adquiridos por unidades multicanais de aquisição de dados. No caso de sinais PD, a unidade de aquisição realiza pré-processamento avançado dos dados não tratados. Os distúrbios são removidos e as principais características do sinal PD são determinadas e transferidas para o servidor que permite seu armazenamento de longo prazo.

O servidor recebe dados para análise, exibição e armazenamento. As unidades de aquisição são configuradas e podem ser controladas remotamente sobre TCP/IP pelo software do sistema de monitoramento. Isso permite que os operadores possam reagir rapidamente aos problemas detectados e acessar os dados armazenados, de qualquer local remoto. O software é um sistema altamente modular e expansível. Sua arquitetura consiste em uma parte central baseada em Windows e uma parte de controle baseada em web (Figura 1). A parte central do software de monitoramento é processada enquanto o Windows é executado continuamente, sem nenhuma interação direta do usuário. O sistema central inclui: coleta e persistência de medição, pós-processamento e análise de dados, tarefas de segurança para acesso de dado, operações do sistema e interfaces externas para trocas de dados sobre Ethernet ou fieldbus.

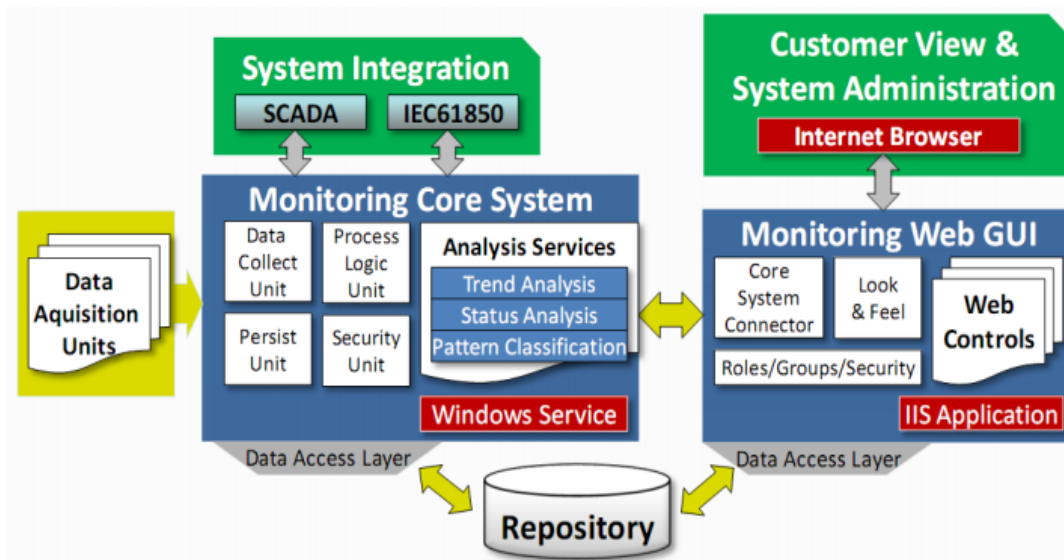


Figura 1. Arquitetura de Software de Monitoramento

O sistema de monitoramento fornece dados a partir de cada unidade de aquisição em dois modos: permanente e periódico. Durante o modo permanente, os dados são adquiridos a cada segundo, comparados com os valores limites e mostrados na interface gráfica do usuário em tempo real. Caso esses dados estejam dentro de margens normais, eles serão coloridos em verde. Se os valores excederem os limites de “aviso” e “alarme” eles são coloridos em amarelo ou vermelho respectivamente.

Medições periódicas são iniciadas em intervalos de tempos iguais como, por exemplo, a cada hora. A duração da medição periódica é normalmente um minuto.

Durante este intervalo de tempo todos os valores escalares mencionados são calculados e o gráfico de amplitude e fase PRPD (Phase Resolved PD) e o diagrama trifásico de relação de amplitude 3PARD (3 Pulse Amplitude Relation Diagram) são obtidos. Estes dados são armazenados para pós-processamento e visualização de tendência.

Medições periódicas não programadas são ativadas caso uma ou mais quantidades medidas excederem os limites.

2.3 Ferramentas de software para avaliação de dados.

Cada tipo de ativo requer o uso de ferramentas específicas que permitem a localização e avaliação do tipo de defeito e sua severidade. A distinção entre ruídos e descargas parciais internas deve ser realizada por meio de um sistema automático de identificação. Para alcançar isto são aplicadas técnicas de avaliação multicanal síncrona (3PARD) [3].

O diagrama 3PARD visualiza a relação entre amplitudes de um único pulso PD em uma fase e os sinais de interferência gerados nas outras duas fases. Através da repetição desse procedimento para um número grande de pulsos, as fontes PD no objeto de teste, bem como os ruídos externos, aparecem como uma concentração claramente distinta de pontos (clusters) em um diagrama 3PARD (Figura 2).

O sistema de monitoramento está configurado para avaliação automática estendida de dados – classificação de fonte PD regularmente (por exemplo: uma vez por dia) ou ativadas por alarme. Neste caso, é realizada uma separação automática de cada concentração de pontos (clusters) no diagrama 3PARD (Figura 3).

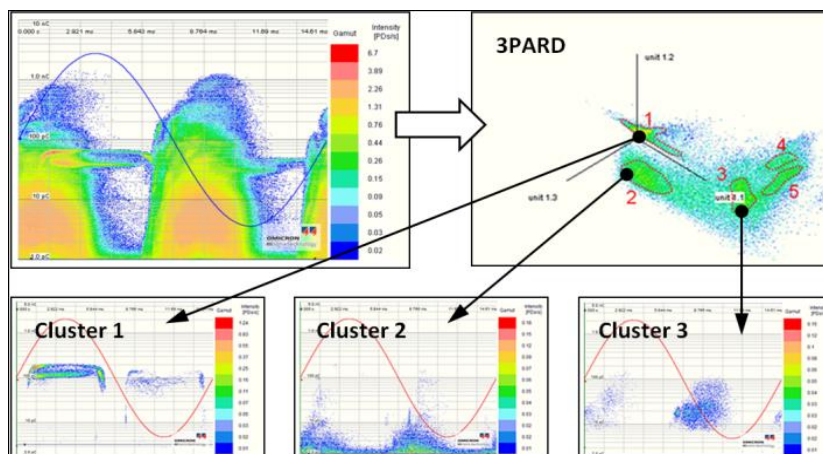


Figura 2. Exemplo de separação de cluster usando a técnica 3PARD

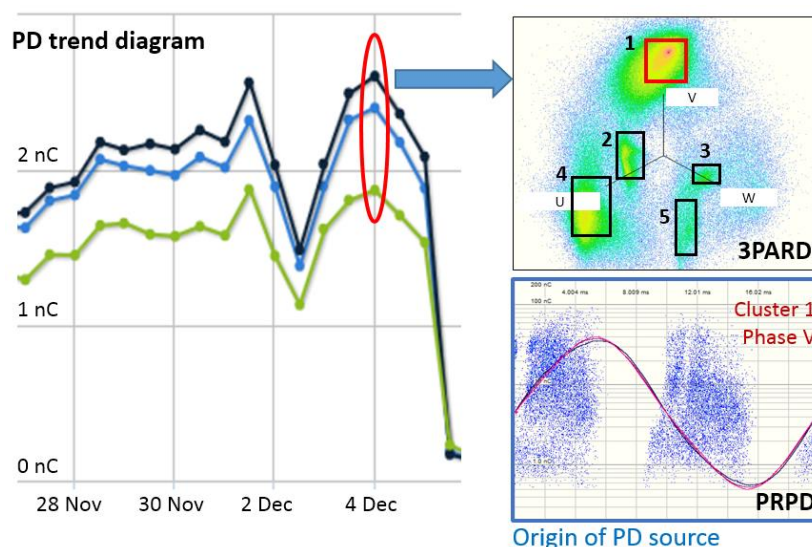


Figura 3. Separação automática de clusters

Para cada cluster, o sistema identifica automaticamente a fase de origem do sinal e indica o gráfico PRPD relacionado a esse cluster como ruído ou PD. Para clusters PD, o conjunto de dados PD, com todas as informações significativas, é salvo para análise por especialistas ou futuras comparações.

No caso de monitoramento de máquinas rotativas, um sistema de classificação automática de falhas foi desenvolvido, de modo a identificar o tipo de falha no isolamento do estator como, por exemplo, delaminação, micro bolhas (ou vazios), descargas de superfície nas cabeças de bobinas, etc. A classificação automática de falhas é baseada na análise de uma base de conhecimento concebida como uma árvore de decisão (Figura 4).

Isso proporciona uma decisão determinística para falhas simples. Para casos mais complexos, onde o sinal PD pode ser associado a mais de um tipo de falha, um procedimento adicional de reconhecimento de padrão é aplicado, o que proporciona uma decisão probabilística. Existem vários procedimentos de reconhecimento de padrões específicos para diferentes grupos de classes de falhas PD, cada um com uma base única de recursos estatísticos (Figura 5). No final, o relatório com análise detalhada da classificação da falha PD é automaticamente gerada.

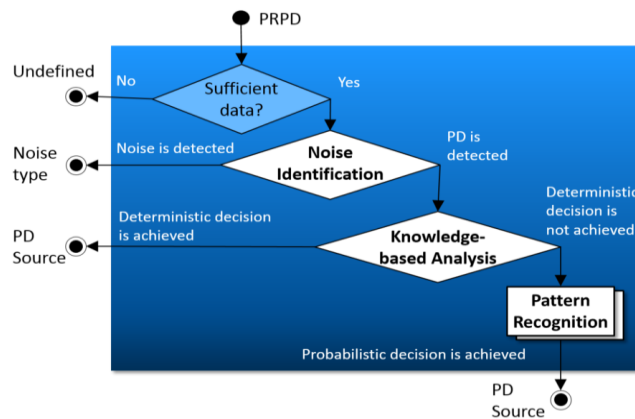


Figura 4. Identificação automática da falha PD

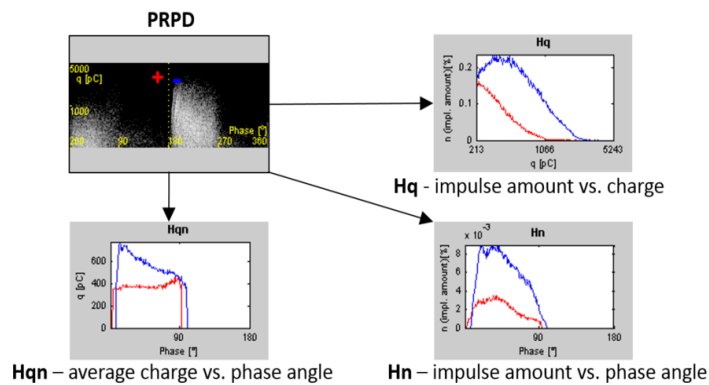


Figura 5. Avaliação estatística dos gráficos PRPD

3. RESULTADOS

3.1 Estudos de Casos

Um enorme progresso foi feito nos últimos 20 anos e o monitoramento de descargas parciais é agora um método prático para avaliação da condição do isolamento do estator em geradores e motores. Mais de 12000 máquinas foram equipadas com monitoramento PD on-line, por vários fornecedores [5]. As razões são para monitorar a condição do equipamento sob condição normal de operação elétrica, térmica e também sob estresse mecânico. Foram desenvolvidos melhor separação de ruídos e métodos de interpretação, confirmando a utilidade e eficácia do monitoramento PD [3, 6]. Nesse capítulo são dados exemplos das melhorias mais recentes na tecnologia de monitoramento.

Os estudos de casos selecionados mostram uma aplicação prática da avaliação do isolamento baseada na condição, dentro do contexto de sistemas de monitoramento complexos. A fim de destacar a flexibilidade da plataforma de monitoramento para diferentes tipos de máquinas rotativas, exemplos de turbo e hidro geradores foram escolhidos.

Turbo e hidro geradores são claramente diferentes em sua construção. Mesmo entre os turbo geradores existem várias soluções (isto é sistema de resfriamento e tecnologia de isolamento), que podem resultar em diferentes atividades de descargas parciais. A comparação direta de resultados de máquinas diferentes não é uma forma adequada de avaliar dados e pode levar a diagnósticos errados. Ao invés, a possibilidade de comparar dados de máquinas similares armazenados em uma plataforma comum, é uma abordagem poderosa para atingir um diagnóstico confiável e para construir uma base de conhecimento sólida das condições de isolamento, para dar suporte eficiente para a gestão de ativos da empresa.

Os dois primeiros estudos de casos mostram a vantagem de se ter um sistema completamente digital, cujas configurações podem ser facilmente adaptadas a mudanças no ambiente, através de ajustes remotos. O terceiro caso representa um caso típico de como proceder com a avaliação das condições de isolamento do estator, quando atividades PD claras são detectadas.

3.1.1 Monitoramento de turbo gerador

Monitoramento de um turbo gerador de 180MVA

Um exemplo onde manutenção preventiva foi ativada pelos resultados do monitoramento PD on-line de um turbo gerador de 180MVA é ilustrado na Figura 6 [7].

O diagrama trifásico de tendências PD e os gráficos PRPD armazenados durante o monitoramento são exibidos. Foi percebido um aumento dos sinais PD na fase W (tendência azul) de 20nC a 75nC, em dois meses (Junho-Agosto).

Ao analisar o gráfico PRPD (Fig. 7), identificou-se o aumento das atividades PD geradas por descargas de superfície nas cabeças de bobinas. Conseqüentemente, o gerador foi retirado de serviço para posterior investigação. A elevada concentração de contaminantes da superfície, especialmente na secção das cabeças de bobinas, foi confirmada durante a atividade de manutenção. Com base nos resultados PD obtidos antes e após a manutenção da máquina, a eficácia do programa de manutenção pode ser avaliada e o momento em que o gerador teve que ser retirado de serviço para a manutenção pode ser decidido.

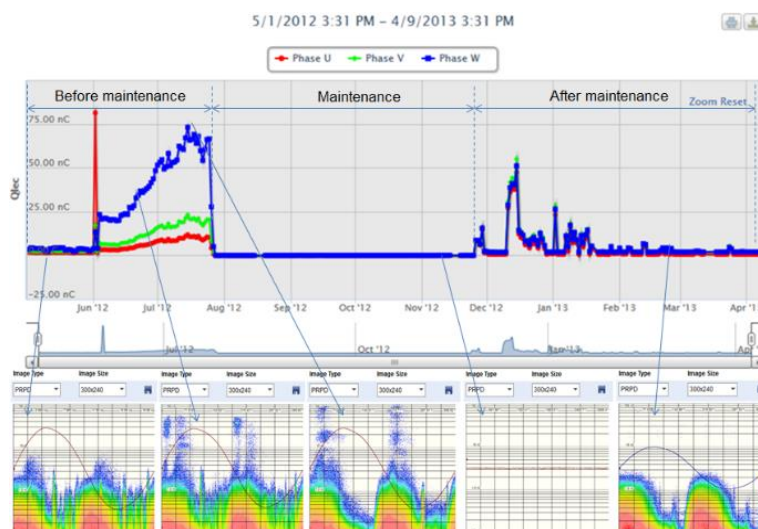


Figura 6. Diagrama trifásico de tendências PD e gráficos PRPD, antes e após manutenção

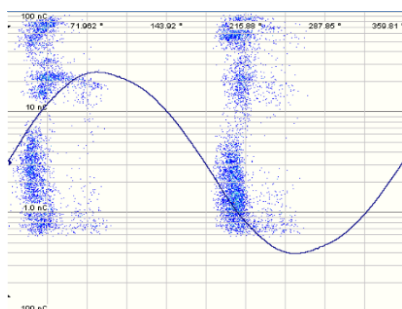


Figura 7. Gráfico PRPD mostrando descargas de superfície nas cabeças de bobinas; a separação dos sinais PD foi realizada utilizando-se a técnica 3PARD

Monitoramento de um turbo gerador de 100 MVA, refrigerado a ar

A forma mais eficiente de conseguir uma avaliação de isolamento confiável sobre o isolamento do estator é através da comparação dos resultados de máquinas semelhantes [8]. O gráfico da Figura 8 mostra a tendência combinada do gerador 1 (Bloco 1 - PLTU1) e gerador 2 (Bloco 2 - PLTU2). Ambos, comissionados em 1981, estão equipados com turbinas a vapor idênticas de 100 MW conectados a geradores 13,2 kV, refrigerados a ar.

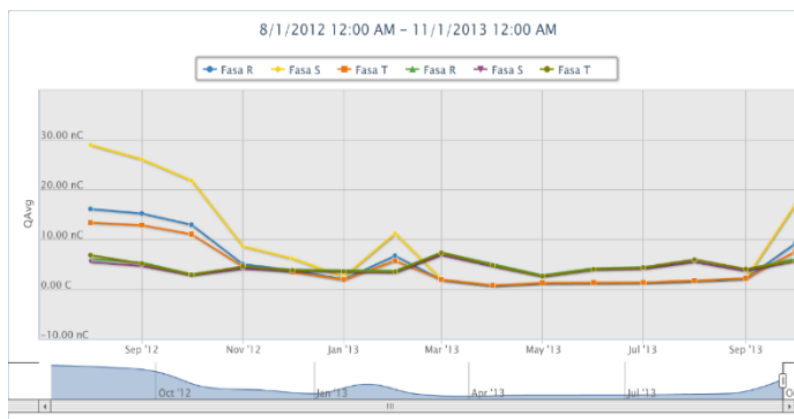


Figura 8. Gráficos combinados de tendência em PLTU1 e PLTU 2

Depois de mais de um ano desde o comissionamento do sistema de monitoramento, foi observado um aumento da atividade PD, entre setembro e outubro de 2013, no gerador PLTU 1 (curvas de tendências azul, amarelo e laranja). A tendência foi ampliada de modo a permitir investigar em detalhe a causa do aumento acentuado na amplitude PD (Fig. 9). O aumento é mais evidente na fase S (amarelo) e tem um comportamento flutuante em todas as três fases, aumentando em média, desde o dia 18 de outubro.

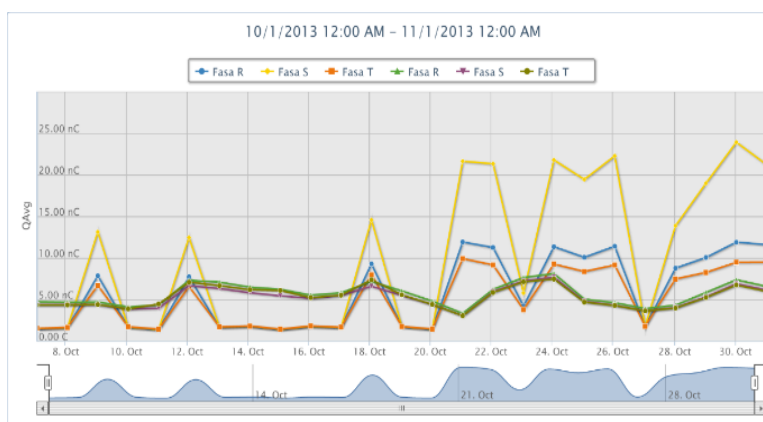


Figura 9. Gráficos de tendência combinados em PLTU1 e PLTU2 relacionados ao período de setembro-outubro 2013

A partir da análise dos padrões gravados, a causa do aumento foi identificada pelo aparecimento de uma fonte de ruído externo ou perturbações que aparecem periodicamente nos gráficos PRPD. A fim de restaurar a capacidade do sistema para monitorar PD exclusivamente, medidas adicionais foram feitas por uma equipe de especialistas com o objetivo de se avaliar um ajuste fino adequado do sistema.

Os resultados dos ensaios, realizados através conexão remota, mostrou que o filtro passa-banda de frequência central de monitoramento pode ser ajustado de 2 MHz a 7 MHz, permitindo que o sistema rejeite o ruído, preservando a sensibilidade adequada aos pulsos PD.

A fim de preservar a possibilidade de comparar os resultados de PLTU1 e PLTU2 e validar a atualização das configurações, o filtro passa-banda de monitoramento foi ajustado para ambas as máquinas. Os resultados, mostrados na Figura 10 confirmam, tanto para PLTU1 quanto para PLTU2, que:

- A capacidade de rejeitar ruídos foi melhorada.
- A sensibilidade para as atividades PD observadas é preservada.
- Os níveis das atividade PD são semelhantes nas duas máquinas, dentro de uma faixa de amplitude de 200 - 400 PC.

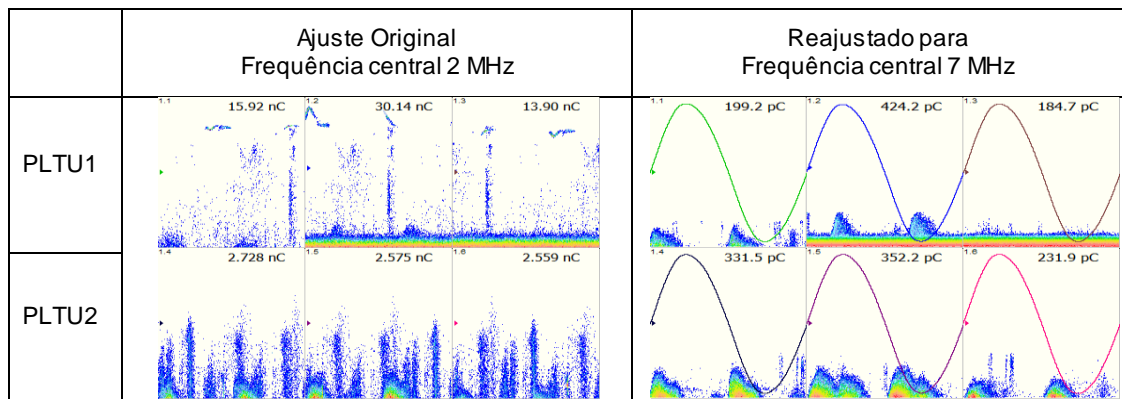


Figura 10. Gráficos PRPD de PLTU1 e PLTU2 para duas frequências centrais de medição diferentes: 2 e 7MHz

3.1.2 Monitoramento de hidro gerador

Um hidrogerador de 126 MVA/16.5 kV (Unidade 7) foi instalado em 1997, juntamente com outros três geradores com o mesmo projeto e fornecidos pelo mesmo fabricante. A usina fornece energia no horário de pico e recupera o sistema elétrico regional no caso de black-out (Black Start-up PP). A instalação de sistemas de monitoramento de DP em todos os geradores foi concluída em 2012.

Desde os primeiros meses, o gerador mostrou aumento acentuado na tendência das atividades PD na fase S. Como todos os geradores têm o mesmo projeto e foram comissionados no mesmo período, eles podem ser considerados comparáveis. A primeira medida tomada foi comparar Unidade 7 com a vizinha Unidade 8 (Figura 11).

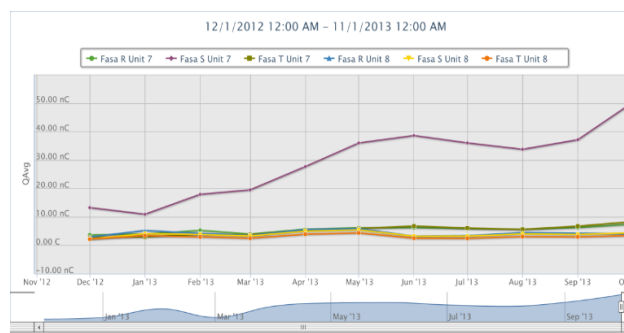


Figura 11. Tendência PD nas Unidade 7 e 8

A partir dos gráficos de tendências de carga média para a Unidade 7 e a Unidade 8, é possível notar o desvio da Fase S da Unidade 7. Para confirmar as atividades na fase S, aquisições do perfil foram feitas periodicamente para identificar o tipo de fonte PD confirmar a localização. Na Figura 12, os resultados para as Unidades 7 e 8 são apresentados, onde cada perfil está sincronizado com a sua tensão de fase. O passo seguinte da avaliação tem como objetivo isolar a fonte investigada de sinal PD dos sinais de outras atividades internas PD. Esta tarefa é realizada por meio da técnica de separação 3PARD (Fig. 13).

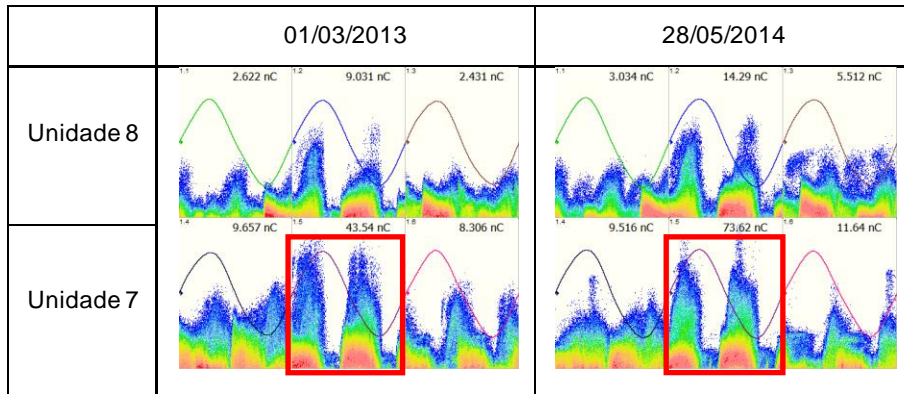


Figura. 12. Gráficos PRPD das Unidades 7 e 8

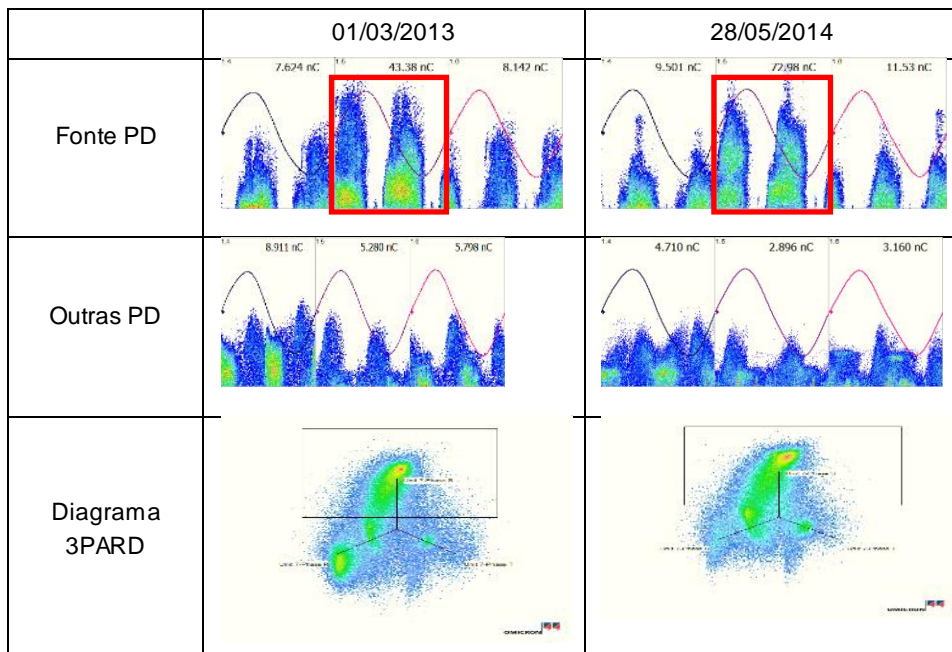


Figura 13. Gráficos PRPD separados: de fonte PD e do ruído na Unidade 7 obtidas em momentos diferentes

A fonte PD investigada, identificado pelo cluster selecionado no diagrama 3PARD, pode ser associado com arvoreamento de superfície localizada na fase S da Unidade 7. Considerando as outras fontes separadamente, é possível ter uma indicação da máquina do ponto de vista de descargas internas, que podem ser consideradas uniformes nas três fases e comparáveis com os valores registrados na Unidade 8 (idêntica à Unidade 7). A inspeção do estator confirmou a presença de atividades PD de superfície em quatro ranhuras, pertencente à fase S investigada (Figura 14).



Figura 14. Evidência de atividades PD de superfície em quatro ranhuras diferentes da fase S

4. CONCLUSÕES

- Uma unidade de aquisição de dados versátil pode ser utilizada para medições PD em diferentes tipos de máquinas rotativas.
- Um sistema de software de monitoramento modular distribuído permite o armazenamento confiável de longo prazo de dados de monitoramento e fornece acesso via interface web para avaliação detalhada de dados.
- Monitoramento PD contínuo dos enrolamentos do estator provou ser uma ferramenta de diagnóstico essencial para a manutenção baseada nas condições de grandes geradores e motores, a fim de aumentar sua confiabilidade. Neste artigo são apresentados exemplos de detecção de descargas de superfície nos enrolamentos do estator .
- Com base nos resultados do monitoramento PD obtidos antes e após um serviço de manutenção da máquina, a eficácia do programa de manutenção pode ser avaliada e a manutenção pode ser adequadamente programada.
- A chave principal para realizar o diagnóstico adequado do estado de isolamento é separar e identificar, com precisão, diferentes fontes PD dos ruídos e distúrbios. Para conseguir isso, técnicas de avaliação multicanal síncrono – 3PARD, podem ser aplicadas.

5. REFERÊNCIAS

- [1] IEC 60034-27-2, edition 1.0: “On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines”, 2012.
- [2] IEEE guide to the measurement of partial discharges in rotating machinery, IEEE Standard 1434, 2000.
- [3] W. Koltunowicz, R. Plath: “Synchronous multi-channel PD measurements”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, pp.1715-1723, vol. 15, no. 6, December 2008.
- [4] A. Claudi, S. Berlijn, P. Mohaupt: “Practical experiences and performance of monitoring systems”, Cigré General Session, 2008.
- [5] G.C. Stone: “A perspective on online partial discharge monitoring for assessment of the condition of rotating machine stator winding insulation”, IEEE Electr. Insul. Mag, vol.28, No.5, pp. 8-13. 2012
- [6] A. Cavallini, A. Contin, G.C. Montanari, and F. Puletti: “Advanced PD interference in on-field measurements”, I. Noise rejection, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. vol. 10, no. 2, 2003.

- [7] L.V. Badicu, W. Koltunowicz, M. Koch and A. Piccolo: "Return of experience from continuous PD monitoring of rotating machines", paper OD1-06, in proceedings of the 18th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH) in Seoul, 2013.
- [8] A. Piccolo, L.V. Badicu and W. Koltunowicz: "Increased operation reliability through continuous PD monitoring in the Java-Bali Region", in proceedings of CEPST Conference, Korea, 2014.