

Capítulo X

Avaliação de descargas parciais Uso de medição com sistemas digitais de múltiplos canais sincronizados para avaliação de transformadores com descargas parciais

Por Marcelo Paulino*

Este artigo apresenta definições, descrição dos efeitos, além de técnicas para análise de descargas parciais. Mostra um sistema de aquisição síncrono multicanal de descargas parciais, onde é possível obter dados a partir de fontes separadas de descargas parciais. No teste de descargas parciais, a separação de múltiplas fontes de ruídos é importante para uma análise adequada de descargas parciais. Sistemas de medição de múltiplos canais sincronizados fornecem novas e avançadas técnicas de avaliação de descargas parciais como 3FREQ, 3PTRD e 3PARD.

Introdução

A indústria elétrica é forçada a manter as antigas instalações em operação devido à crescente pressão para reduzir custos. Além disso, os equipamentos elétricos instalados em subestações podem ser solicitados a operar sob diversas condições adversas e não se pode descartar a possibilidade de ocorrerem falhas que deixem indisponíveis as funções transmissão e distribuição de energia elétrica aos quais pertencem. Assim, a verificação regular das condições desses equipamentos torna-se cada vez mais importante, seja no comissionamento, nas atividades de manutenção preventiva ou processos de reparo. Torna-se imperativo a busca

de procedimentos e ferramentas que possibilitem a obtenção de dados das instalações de forma rápida e precisa.

A norma IEC 60270 define descargas parciais como descargas elétricas localizadas na união entre dois condutores, por meio do isolamento, que pode ou não ocorrer próximo de um condutor. Descarga parcial é, em geral, a consequência de uma concentração de estresses elétricos em isolamentos ou em superfície de isolamentos. A medição síncrona de múltiplos canais é uma poderosa ferramenta na detecção, localização e separação de sinais de descargas parciais de ruídos de fundo quando da realização de testes em transformadores trifásicos, motores, geradores e cabos.

Tal método permite que o mesmo sinal seja detectado em mais de um medidor simultaneamente. Isto é fundamental para o processo de localização e diferenciação das diversas fontes geradoras de descargas internas que podem ser provenientes do efeito corona, descargas do tipo superficiais, descargas geradas em gaps que são comuns principalmente em geradores, motores e descargas provenientes dos próprios elementos do circuito de medição como a fonte de tensão que alimenta o circuito, filtros, transformadores elevadores, buchas

capacitivas e capacitores de acoplamento.

Neste texto, são apresentadas definições de descargas parciais internas que são geradas devido a contaminação do isolante, defeito de fabricação de resinas e até mesmo deterioração de componentes. Os requisitos de hardware para o teste visando à realização de medidas adequadas são observados. As características como taxas de amostragens e imunidade a ruídos são especialmente tratadas na concepção do sistema de teste descrito.

Este trabalho apresenta um novo método que trata a separação entre o sinal medido e o ruído provocado por interferências externas. Assim, é possível separar ruídos de diferentes fontes de descargas parciais localizadas no mesmo objeto sob teste. Os sinais de descargas parciais são frequentemente sobrepostos por pulsos de ruído, fato que faz uma análise dos dados de DP mais difícil para os especialistas e sistemas de software especializados.

Com o desenvolvimento contínuo de unidades de teste e monitoramento de descargas parciais, os sistemas de análise precisam se tornar mais eficazes e automáticos. Esse trabalho mostra um sistema de aquisição síncrono multicanal de descargas parciais, no qual é possível obter dados a partir de

fontes separadas de descargas parciais, a fim de fazer medições mais confiáveis.

Definição de descargas parciais

Uma Descarga Parcial (DP) é caracterizada como uma descarga elétrica de pequena intensidade que ocorre em uma região de imperfeição de um meio dielétrico sujeita a um campo elétrico, em que o caminho formado pela descarga não une as duas extremidades dessa região de forma completa. A ocorrência de descarga parcial depende da intensidade do campo aplicado nas extremidades desse espaço, além do tipo de tensão de teste aplicada (tensão alternada, tensão contínua, sinal transitório ou impulso).

A norma IEC 60270 faz referência à medida de descargas parciais em sistemas e equipamentos elétricos com tensões alternadas de até 400 Hz. Nesses equipamentos, tem-se a ocorrência de avalanches de elétrons nos espaços vazios. Assim, descargas em dielétricos podem ocorrer somente em espaços gasosos ou fissuras nos materiais sólidos ou bolhas no dielétrico líquido.

Portanto, descargas parciais são iniciadas geralmente se a intensidade do campo elétrico dentro do espaço vazio exceder

a intensidade do campo do gás contido nesse espaço. O pulso de carga criado geralmente tem valores em torno de alguns pC até na ordem de nC, dependendo do aparato que está sendo analisado.

A norma IEC 60270 define Descarga Parcial como: “Descargas elétricas localizadas que simplesmente faz a ligação parcial entre dois condutores através do isolamento. Descarga Parcial é, em geral, a consequência de uma concentração de tensão elétrica local no isolamento ou sobre uma superfície de isolamento. Geralmente, tais descargas aparecem como pulsos com a duração menor que 1 μ s”.

As descargas parciais podem ser classificadas de acordo com a natureza da sua origem. Podem ser do tipo superficial, corona, buraco interno, contaminante em resinas, bolhas de gases em dielétricos líquidos, entre outros.

Descargas superficiais

Elas ocorrem em gases ou líquidos na superfície de um material dielétrico, normalmente partindo do eletrodo para a superfície. Se a componente de campo elétrico que tangencia a superfície excede um determinado valor crítico, o processo de descarga superficial é iniciado. Esse processo é conhecido como trilhamento e pode levar à ruptura completa da isolação.

Descargas externas

Descargas parciais no ar ambiente geralmente são classificadas como “descargas externas” e, frequentemente, chamadas de “descargas corona”. No início do processo de indução da tensão, brilho e correntes de descargas podem aparecer. Elas ocorrem em gases a partir de pontas agudas em eletrodos metálicos em partes com pequenos raios de curvatura.

Isso forma regiões nas vizinhanças dessas pontas com elevado campo elétrico, ultrapassando o valor de ruptura do gás. Esse processo químico desencadeado por descargas no gás cria subprodutos que são incorporados ao meio gasoso. Assim, os processos no ar ambiente puro podem ser considerados como reversíveis e geralmente inofensivos. Entretanto, descargas corona no ar geram ozônio, causando fissuras na isolação polimérica. Óxidos de nitrogênio junto com o vapor d’água podem corroer metais e depositar material condutor em isoladores. Isso causa o trilhamento do material.

Descargas internas

As descargas internas ocorrem nos espaços geralmente vazios preenchidos com gás, presentes nos materiais sólidos e líquidos usados em sistemas de isolamento. As descargas em

isolamentos sólidos podem ocorrer em cavidades capilares de gás, em vazios ou trincas, podendo ser estabelecidos em defeitos da estrutura molecular. Nos isolantes líquidos, as descargas parciais podem ocorrer em bolhas de gás devido a fenômenos térmicos e elétricos e em vapores de água criados em regiões de alta intensidade de campo elétrico.

Um tipo particular de descargas internas são as descargas que ocorrem em arborescências elétricas. A arborescência (treeing) elétrica é um fenômeno de pré-ruptura que ocorre no interior da isolação de equipamentos elétricos, tais como cabos de potência isolados, tendo sua origem devido à ocorrência contínua de descargas parciais internas em vazios ou a partir de uma falha no eletrodo. Este texto considera a partir deste ponto que o termo descarga parcial será sempre utilizado para designar descarga parcial interna.

Sistemas de medidas analógicas de descargas parciais

As medidas analógicas de descargas parciais começaram na década de 50 com instrumentos que abriam caminho para a medida de carga aparente com pC no lugar das medidas de RIV (Tensão de Rádio Interferência) em μ V.

Esses instrumentos têm frequência central fixa e com as frequências de corte inferior e superior ajustadas em etapas. A largura de banda estabelecida de 100 kHz a 400 kHz. Em comparação com os instrumentos de banda estreita, a resolução para medida dos pulsos de descargas parciais foi significativamente aperfeiçoada. Geralmente, esses instrumentos analógicos de descargas parciais consistiam em um filtro de passagem de banda e um indicador de nível de pico.

Desde que o filtro de passagem de banda extraía pulsos de descargas parciais onde a densidade espectral é constante, o pico da resposta do filtro será proporcional à carga aparente do pulso de corrente de descargas parciais.

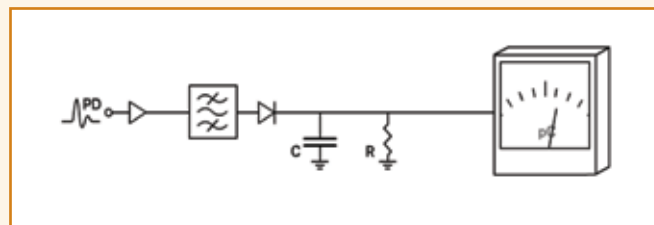


Figura 1 – Representação de esquema tradicional de medida de DP.

A saída do filtro de passagem de banda era correlacionada à fase de tensão de corrente alternada e representada pelo diagrama de amplitude e fase PRPD (phase-resolved partial discharge). O primeiro catálogo para reconhecimento da

origem de descargas parciais, publicado pelo Cigré em 1969 se aproximava muito desses valores. Desde aquele tempo, houve muito pouco avanço com relação ao conjunto de circuitos de medição, dependendo de conjunto de circuitos analógicos convencionais para o processamento de sinais.

Com o uso de equipamentos microprocessados na medida de descargas parciais, utilizando uma nova interface para gerenciar o teste e obter os resultados, foram realizadas tentativas de classificação de descargas parciais. Entretanto, esses sistemas tinham poucos parâmetros nos quais se basear, com resultados limitados.

Sistema de medidas digitais de descargas parciais

A introdução de sistemas digitais de medida de descargas parciais resultou na melhoria da sensibilidade e da repetibilidade das medidas de descargas parciais, excedendo em muito as capacidades daqueles sistemas mais antigos de medida de descargas parciais. Os modernos sistemas digitais de descargas parciais aplicam processamento síncrono de sinais dessas descargas em múltiplos canais. Isso torna a análise estatística muito mais eficiente. Torna possível e mais eficaz a discriminação entre os eventos, sejam descargas parciais ou ruídos, e capacita também o sistema de teste para identificação dos tipos de falhas e sua localização.

O moderno e avançado sistema digital de medição de descargas parciais está projetado para efetuar medidas em tempo real de DP contínuas e síncronas em canais múltiplos. A Figura 2 mostra um exemplo de projeto para um sistema de medição de descargas parciais. O projeto desse sistema é modular, constituído de mais de uma unidade de aquisição de dados. Essas unidades podem ser conectadas a um computador, e a conexão de fibra ótica permite grandes distâncias entre a unidade de aquisição e o computador, inclusive entre as outras unidades conectadas ao sistema sob medida.

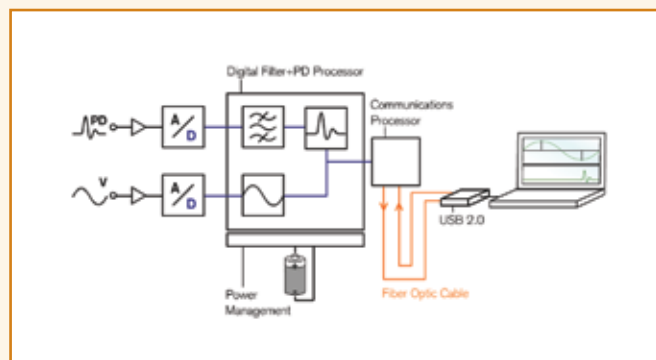


Figura 2 – Representação de esquema microprocessado de medida de descargas parciais.

O sinal de descargas parciais é filtrado, amplificado e digitalizado em tempo real. O operador do sistema de teste pode escolher livremente a frequência central de medida de CC a 20 MHz, sendo a largura de banda selecionável de 9 kHz a 3 MHz. Isso permite ao operador aperfeiçoar a relação sinal-ruído, mesmo sob ambientes com alta interferência. A sincronização de sinais alternados, bem como a exibição da forma de onda e leitura da amplitude desse sinal CA, é realizada por um segundo conversor analógico digital, responsável pela digitalização da forma de onda de tensão medida.

Toda a aquisição e pré-processamento de dados são efetuados na unidade de aquisição, próximo ao local da medida do sinal. Isso garante um ótimo desempenho em velocidade de medida e qualidade de sinal. Um vetor de quatro parâmetros é identificado para cada pulso individual de descarga parcial: $[n; q_i; j_i; t_i]$, em que n é o número da unidade de aquisição, q_i o valor da carga aparente, j_i o ângulo de fase em tensão CA, e t_i o registro de tempo absoluto. Paralelamente é feita a amostragem do valor instantâneo da tensão em CA.

Ao lado de algoritmos matemáticos de análise de descargas parciais utilizados em medidas de descargas parciais em um único canal, podem-se obter enormes vantagens utilizando a medida síncrona de várias posições em associação. Isso pode ser realizado em cabos de alta tensão de alguns quilômetros de comprimento, com medidas de descargas parciais em suas conexões ou em um transformador de potência trifásico com medidas de descargas parciais em cada enrolamento.

Em decorrência dos diferentes locais de origem, os pulsos de descargas parciais e as interferências se propagam por diferentes trajetos até serem requisitados pelo sistema de medição de descargas parciais. As formas de onda de pulsos detectados serão conseqüentemente diferentes, e assim relações de magnitudes e tempos de chegada do sinal serão únicas para cada origem de descargas parciais.

As relações entre os diferentes pulsos requisitados por um sistema multicanal possibilitam a separação distinta dos pulsos diferentes de descargas parciais e interferência. Para assegurar a correlação correta de pulsos, o espaço de tempo da detecção síncrona de descargas parciais deve ser tão curto quanto possível, tipicamente inferior a 1 μ s ou 2 μ s.

A Figura 3 apresenta uma vista ilustrativa de um sinal de descargas parciais dentro da unidade do sistema, desde a conversão Analógica/Digital do sinal até a extração dos parâmetros do pulso em um sistema de três canais.

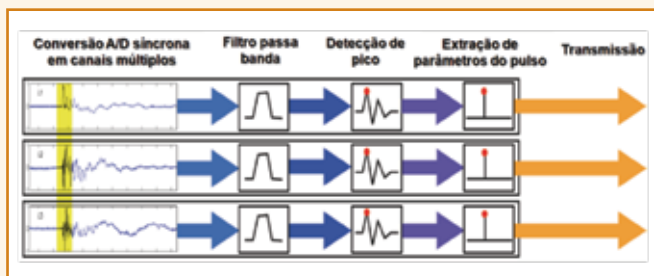


Figura 3 – Processamento de dados de DP em canais múltiplos com três unidades de aquisição de DP.

A extração dos parâmetros do pulso possibilita velocidades de processamento de dados em tempo real de até $1,5 \times 10^6$ pulsos por segundo. A essa velocidade, os parâmetros selecionados dos pulsos de três diferentes unidades de aquisição podem ser correlacionados e exibidos em diferentes diagramas de avaliação: 3PARD, 3PTRD e 3CFRD. Cada um desses diagramas separa diferentes origens de tipos de pulsos em agrupamentos. Além disso, cada agrupamento é selecionável para exibir de volta na configuração PRPD, apresentando ao operador uma única origem de descargas parciais para observar. Estes três métodos são descritos a seguir.

Avaliação dos resultados de descargas parciais

As medidas de descargas parciais são frequentemente realizadas sob ruídos. O sinal de descarga parcial é sobreposto por um ruído, ou mesmo vários ruídos de várias fontes, criando dificuldades para análise dos resultados. Os filtros de frequência convencionais não são capazes de eliminar essas perturbações e os sistemas especialistas automatizados têm dificuldades em analisar no caso de ocorrência de falhas múltiplas, com a superposição dos sinais dessas falhas e de ruídos externos. A separação dos sinais é o primeiro passo realizado pelo sistema apresentado neste trabalho. No futuro, este método se tornará ainda mais importante com o aumento do número de sistemas de monitoramento de descargas parciais instalados na rede elétrica.

Diagrama de relação de amplitude em 3 fases (3 – Phase – Amplitude – Relation – Diagram – 3PARD)

A aquisição síncrona de dados de descargas parciais para as três fases de um equipamento de alta tensão permite uma comparação da amplitude de cada pulso requisitados. A Figura 4 mostra a ocorrência de uma falta interna na fase L1, com a propagação dos pulsos para cada fase representados em azul.

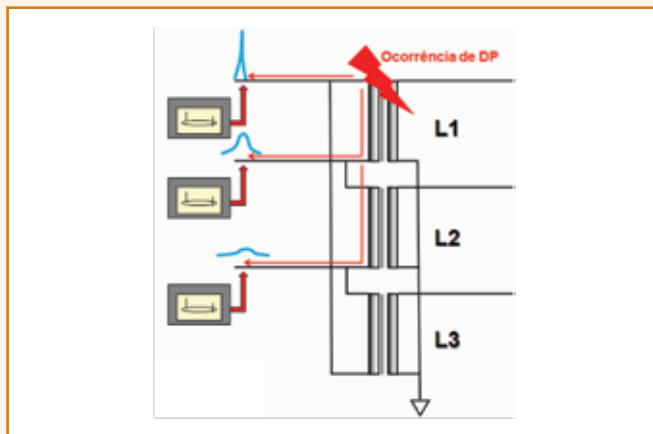


Figura 4 – Ocorrência de falha interna em L1 e propagação dos pulsos.

As relações das amplitudes dos pulsos triplos requisitados são constantes para diferentes fontes de descargas parciais e para diferentes fontes de ruído. Isso ocorre devido ao caminho original de propagação de descargas parciais. Para ocorrências internas específicas no equipamento sob teste, os pulsos requisitados apresentam diferenças. Assim, a primeira etapa para a localização de descargas parciais é a separação das fontes. Durante a medição de DP, em tempo real, são criados Diagramas Trifásicos de Relação de Amplitude (do inglês 3 – Phase – Amplitude – Relation – Diagram – 3PARD).

A separação de fonte 3PARD foi usada na prática com resultados confiáveis, conforme descrito em várias publicações científicas. Vale ressaltar que a aquisição de dados síncrona de DP é imprescindível para avaliação dos dados com 3PARD. O sistema utilizado neste trabalho possui um método de medição sequencial de três canais múltiplos. A primeira etapa é calcular o logaritmo do valor absoluto de todos os três pulsos das descargas.

Na segunda, cada pulso é transformado em um fasor relacionado à sua fase de origem. A Figura 5 mostra o mecanismo de geração do 3PARD e à direita os sinais de tensão de cada fase são observados. Quando os fasores relativos a cada fase medida são transportados para o diagrama, é obtida a localização da fonte de descarga parcial interna pela soma vetorial, conforme mostrado no quadro à esquerda.

Um único sinal de descarga parcial é representado por um ponto. Cada agregação de pontos calculados (clusters) representa a única fonte de descarga parcial. Posteriormente, cada grupo pode ser facilmente separado e mostrado sem efeitos de sobreposição, transformado em uma PRPD clássica ou de qualquer outro diagrama de pulso para avaliação em tempo real. O sistema de teste utilizado fornece a ferramenta de criação de cluster, ou seja, áreas determinadas no 3PARD de onde são separados os sinais que, a priori, aparecem sobrepostos. A Figura 6 mostra o 3PARD com a separação dos sinais.

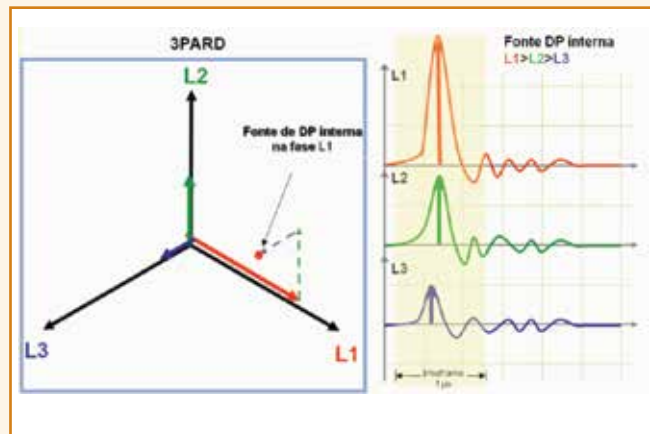


Figura 5 – Criação de 3PARD usando sinais de tensão de Descargas Parciais.

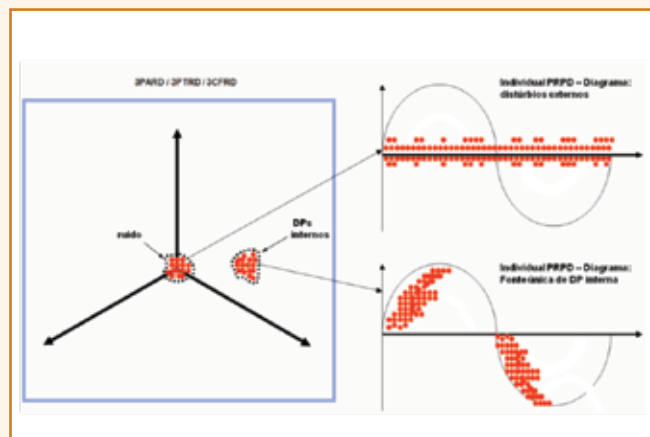


Figura 6 – Representação de 3PARD com a separação dos sinais individuais.

Diagrama de relação de tempo em 3 fases (3 – Phase – Time – Relation – Diagram 3 PTRD)

Usando o princípio do 3PARD, este método é resultado da avaliação do atraso do pulso triplo de descarga parcial. Similar ao método conhecido pelo teste de descargas parciais, usado para localização de falhas com cabos de alta tensão, cada fonte de pulso tem uma impressão digital característica com diferenças de tempo devido ao atraso de cada pulso.

Se a origem das descargas parciais estiver distante do local da detecção, as amplitudes de pulso de uma descarga parcial tendem a se igualar entre as fases e apresentarão um modo comum de propagação. Conseqüentemente, origens de descargas parciais muito distantes serão exibidas próximas da origem do 3PARD, limitando a capacidade identificar essas origens. Além disso, a propagação distante amortece componentes de alta frequência dos sinais de descargas parciais (efeito passa baixa), o que exige o uso de baixa frequência de medida para manter a sensibilidade necessária.

Em baixas frequências de medida, os pulsos de descargas

parciais se propagam em modo lento (propagação pela linha de transmissão). Portanto, a distância de propagação e o tempo de chegada estão diretamente correlacionados, o que pode ser usado para distinguir origens de descargas parciais muito distantes. Assim, o 3PTRD foi desenvolvido para correlacionar tempos de chegada de três sinais de descargas parciais. A Figura 7 mostra a construção lógica do 3PTRD e o diagrama está dividido em seis seções iguais, em que é apresentada cada uma das seis combinações possíveis de pulsos triplos.

A Figura 8 apresenta uma visualização de diferentes diferenças de tempo entre os pulsos de PD detectados nas fases L1, L2 e L3. Por exemplo, se a diferença de tempo entre os primeiros dois pulsos for muito pequena, então o ponto resultante seria exibido entre os eixos geométricos onde esses pulsos são detectados (Figura 8, I). Se os dois últimos pulsos ocorrerem quase simultaneamente, o ponto resultante seria exibido sobre o eixo geométrico onde o primeiro pulso é detectado (Figura 8, II). Caso todos os

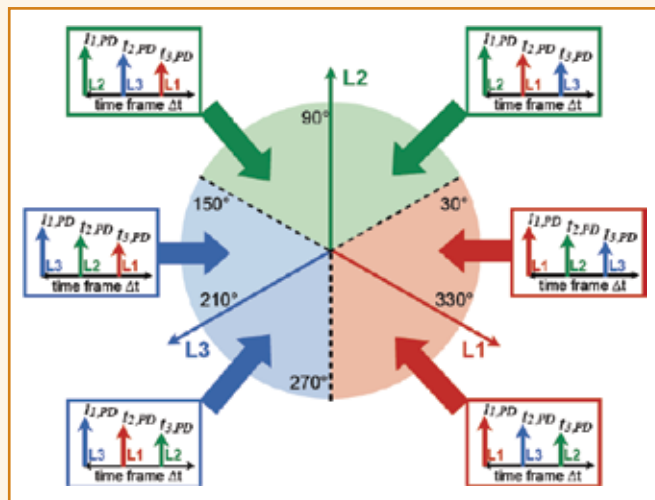


Figura 7 – Segmentos de visualização de 3PTRD para seis diferentes ordens de chegada de pulsos.

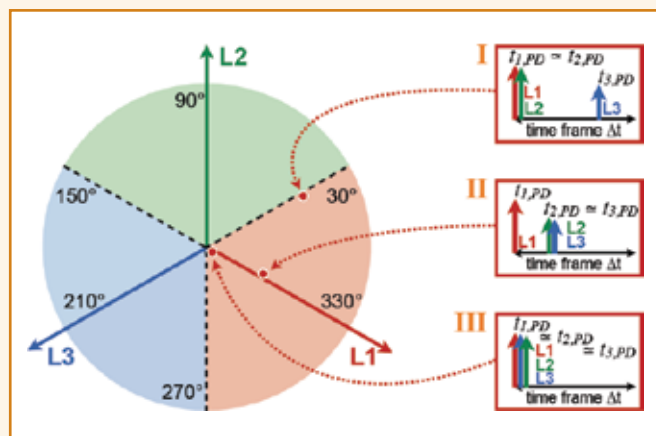


Figura 8 – Visualização de diferenças de tempo entre os três pulsos de DP dentro do segmento L1.

três pulsos sejam detectados quase ao mesmo tempo, o comprimento do vetor seria zero, o que faz o ponto ser exibido na origem do diagrama (Figura 8, III).

Diagrama de relação de frequências em 3 canais (3 – Center – Frequency – Relation – Diagrama – 3 CFRD)

O diagrama da relação de frequências correlaciona a medida de descarga parcial realizada em três frequências simultaneamente. A amplitude do sinal é medida em cada frequência. Assim, o sinal de saída de três filtros com frequências centrais e/ou diferentes larguras de banda permite análise do pulso em cada um dos três pontos de medida. Isso se deve ao fato de que, devido à descarga física, diferentes tipos de descargas parciais ou pulsos de ruído têm espectros de energia diferentes.

Em contraposição aos métodos 3PARD e 3PTRD, a avaliação pelo 3CFRD não exige necessariamente três unidades independentes de aquisição, pois pode ser usado com uma única unidade de aquisição. Em geral, o primeiro filtro de passagem de banda deve ser sintonizado para uma frequência central baixa, a fim de possibilitar o atendimento às normas técnicas IEC ou IEEE.

A segunda e terceira passagens de banda são sintonizadas para frequências mais elevadas, determinadas pelo responsável pelo teste, em que os efeitos da propagação dos pulsos causam diferenças já distinguíveis nas respostas espectrais do sinal de descarga parcial medido. Mediante a escolha correta das frequências para passagem de banda, torna-se possível efetuar medições de descargas parciais em conformidade com as normas técnicas. Ao mesmo tempo se remove praticamente toda a interferência sobreposta.

O 3CFRD correlaciona a saída dos três filtros de

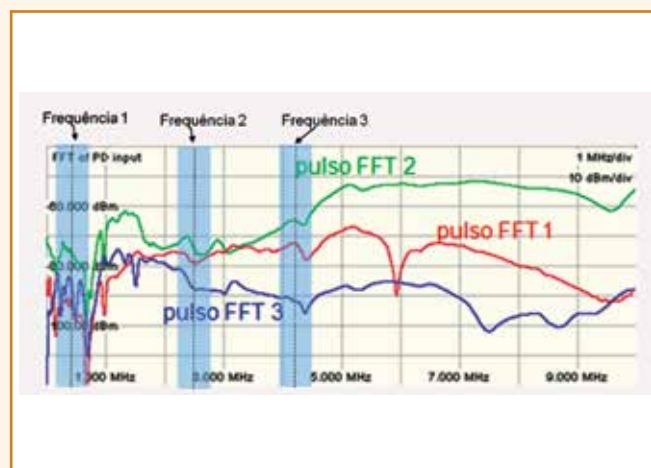


Figura 9 – Exemplo de representação FFT para classificação dos pulsos de descargas parciais com a determinação de três filtros de passagem de banda.

passagem de banda de uma maneira semelhante ao 3PARD com a utilização das amplitudes de pulso de três canais de descarga parcial. A Figura 9 mostra um exemplo de representação FFT de pulsos de descarga parcial com a determinação de três filtros de passagem de banda.

Um exemplo de medida evidenciando ruído e corona é mostrada na Figura 10. Uma vez determinada as frequências, os resultados de teste de descargas parciais é apresentado em um 3CFRD. No diagrama pode-se realizar a separação dos sinais individuais com a marcação de clusters. A Figura 14 mostra um exemplo com a construção de 3CFRD e a separação de clusters.

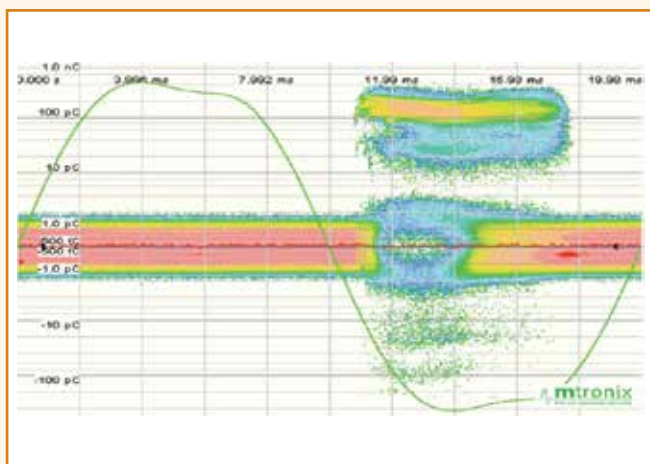


Figura 10 – Resultados de teste de descargas parciais sobrepostas.

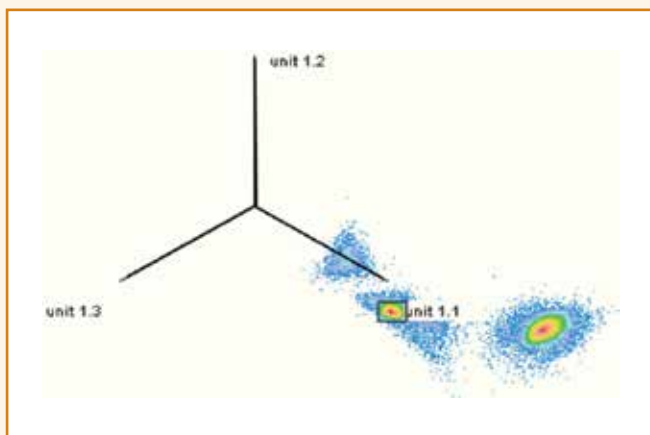


Figura 11 – Resultados de teste de descargas parciais com a apresentação de 3CFRD com a separação dos sinais individuais nos clusters marcados.

Para cada cluster os eventos de descargas parciais podem ser separados e recalculados em tempo real, provocando uma limpeza no PRPD (phase-resolved partial discharge). A Figura 12 mostra o resultado para o cluster do diagrama mostrado na Figura 11.

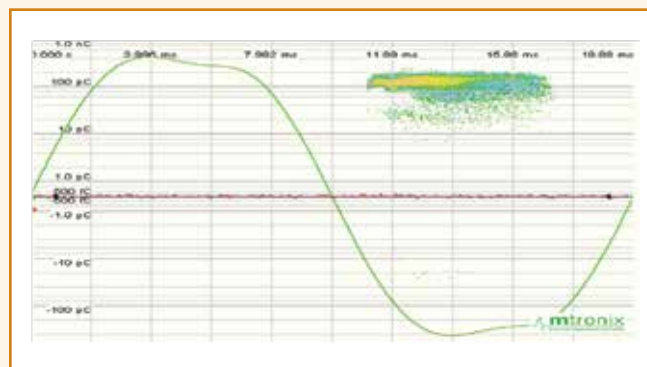


Figura 12 – Representação de amplitude e fase (PRPD).

Considerações finais

Os modernos sistemas digitais de detecção de descargas parciais utilizam um sistema de aquisição síncrono multicanal, em que é possível obter dados a partir de fontes separadas descargas parciais e discriminá-las de outras origens. No teste de descargas parciais, a separação de múltiplas fontes de ruídos é importante para uma análise adequada de descargas parciais. Foi mostrado que, com técnicas de avaliação de descargas parciais como 3FREQ, 3PTRD e 3PARD, é possível realizar uma análise adicional e localizar descargas parciais.

Referências

- IEC 60270. *High-voltage test techniques – partial discharge measurements. Third edition, 2000.*
- CIGRÉ WG 21.03. *Recognition of discharges. Electra Magazine, n. 11. Paris, 1969.*
- KOLTUNOWICZ, W.; PLATH, R.; WINTER, P. *Developments in Measurements of Partial Discharge. OMICRON electronics GmbH. Austria, 2009.*
- OMICRON ELECTRONICS. *MPD 600 User Manual, Version: MPD600.AE.2. Austria, 2009.*
- PAULINO, M. E. C. *Estado da arte da medição com múltiplos canais sincronizados para avaliação de descargas parciais. Proc. 2010 IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conf. São Paulo, 2010.*

* MARCELO EDUARDO DE CARVALHO PAULINO é engenheiro eletricista e especialista em manutenção de sistemas elétricos pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI). Atualmente, é gerente técnico da Adimarco |mecpaulino@yahoo.com.br.

Continua na próxima edição

Confira todos os artigos deste fascículo em
www.osetoreletrico.com.br

Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail
redacao@atitudedeeditorial.com.br