



## PLATAFORMA PARA MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM CABOS, BASEADA EM SENSORES NÃO INVASIVOS

Gabriel Machado Bernardes<sup>1</sup>, Daniel Pereira de Carvalho<sup>1</sup>, Alan Petrônio Pinheiro<sup>1</sup>, Alailton José Alves Júnior<sup>1</sup>, Andréia Coelho Domingos<sup>1</sup>, Daniel Braga Melo<sup>1</sup>, Rafael de Sousa Santos<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratório de Redes Inteligentes (LRI) - Universidade Federal de Uberlândia

**Resumo** – O monitoramento de descargas parciais se mostra como um dos meios mais confiáveis de se caracterizar a confiabilidade de um cabo de média a alta tensão. No processo de aquisição de sinais de descargas parciais, a construção de instrumentos de medição é um fator crítico para um bom resultado de soluções de IoT voltadas ao estudo dos cabos. Além disso, o instrumento deve ser preparado para o trabalho em campo, evitando assim, corte de fornecimento ao realizar a medição. Tendo isso em mente, nesse trabalho é apresentada uma solução de hardware que seja compatível com o uso de sensores não invasivos, além de possuir considerável resistência à ruído.

**Palavras-Chave** – Digitalização de Alta Frequência, Descargas Parciais, HFCT.

### PLATFORM FOR MEASURING PARTIAL DISCHARGES BASED ON NON-INVASIVE SENSORS

**Abstract** - Monitoring partial discharges is one of the most reliable ways of characterizing the reliability of a medium to high voltage cable. In the process of acquiring partial discharge signals, the construction of measuring instruments is a critical factor for good results in IoT solutions aimed at studying cables. In addition, the instrument must be prepared for work in the field, thus avoiding supply cuts when taking measurements. With this in mind, this work presents a hardware solution that is compatible with the use of non-invasive sensors and has considerable resistance to noise.

**Keywords** - High Frequency Scanning, Partial Discharge, HFCT.

#### I. INTRODUÇÃO

No processo de evolução constante em tecnologia, pode ser notado um recente interesse em soluções de IoT, em especial aquelas voltadas para o monitoramento de redes de

potência. A facilidade advinda de sistemas com essa abordagem leva em consideração fatores como a leitura remota de dados e possível corte de carga em casos de emergência [1]. Tais vantagens estão entre os principais motivos do aumento de publicações nessa área.

A popularização crescente da Internet das Coisas e a sua associação com redes de potência fez surgir uma área nova de estudo, denominada Smart Grids (ou Redes Inteligentes). Dentre os objetivos da implementação do conhecimento adquirido nessa área, um dos mais recorrentes é a busca por economia de energia e de recursos através do uso sustentável da energia elétrica [1]. Um ramo dessa área se destina ao estudo de confiabilidade de cabos e equipamentos elétricos, baseado no sensoriamento das características dos mesmos.

Ao implementar um sistema de monitoramento em tempo real baseado em Smart Grids, espera-se que o equipamento possa ser avaliado em campo, sem que haja paralização de operações. Uma das formas de avaliar a confiabilidade de um equipamento de potência de maneira adequada e sem corte pontual de energia, é através do monitoramento de descargas parciais. As descargas parciais são um bom indicativo de envelhecimento de equipamentos, sendo a sinalização mais confiável no que diz respeito ao surgimento de possíveis fugas de corrente em áreas onde o isolamento é mais fraco [2]. Busca-se, em soluções de IoT, montar um sistema que seja capaz de relacionar a ocorrência de descargas parciais no cabo com a sua taxa de deterioração, unindo os conhecimentos matemáticos necessários da área para garantir a manutenção preventiva da rede elétrica analisada.

A medição de descargas parciais pode ser feita de maneira off-line pelo método elétrico convencional descrito no padrão IEC60270 [3], ou através de meios não convencionais. Dentre os meios não convencionais, destacam-se os métodos: acústico, óptico, eletromagnético e elétrico não-convencional [2]. Este último utiliza-se de procedimentos de medição não invasivos, fazendo o uso de transformadores de corrente de alta frequência (HFCT) [4]. Isso torna o método elétrico não-convencional atrativo para medições online, onde espera-se monitoramento constante.

Outra preocupação decorrente do estudo de descargas parciais trata do tipo de descarga que ocorre no cabo, uma vez que tipos diferentes de DP exigem níveis diferentes de cuidado, dado à gravidade de cada caso. Segundo [2], os tipos

de descarga parcial são: descarga interna e descargas de superfície, dentre as quais pode-se verificar os motivos: descargas por defeitos de protrusão, arborização elétrica, delaminação e contaminantes. A ocorrência de cada um dos tipos de DP tem associação direta com a fase da tensão em que ela ocorre [2], o que demonstra a necessidade de monitorar não apenas os pulsos de DP, bem como a tensão de alimentação. Uma forma não invasiva de medir a fase da tensão no cabo é medindo sua corrente através do uso de uma bobina de Rogowski com um integrador em série [5].

No projeto de um hardware para medição de descargas parciais, deve-se garantir o bom condicionamento do sinal, com ajuste correto para as faixas de frequência, bem como casamento de impedâncias adequado. A baixa relação sinal ruído na saída do HFCT [2] deve ser compensada no hardware, através de filtros e técnicas de amplificação bem ajustadas. A observação desses pontos é a garantia do bom funcionamento da solução de monitoramento da confiabilidade dielétrica dos cabos.

No presente trabalho, tem-se o objetivo de implementar esse hardware, visando a sua integração com os sensores descritos.

## II. REFERENCIAL TEÓRICO

### *a – Descargas Parciais*

A norma da ABNT IEC60270 [3] diz que a descarga parcial é uma “descarga elétrica localizada que curto-circuita apenas parcialmente o isolante entre condutores [...]”. Defeitos de fabricação na isolação dos cabos tornam a isolação propensa ao aumento do estresse elétrico no ponto defeituoso, de tal forma que o campo seja maior que a rigidez dielétrica [6]. Esse processo propicia o surgimento de descargas parciais nesse ponto, onde é possível verificar a degradação gradual do isolamento até que ocorra curto-circuito completo entre os condutores. Em um cabo XLPE, o curto-circuito ocorre entre a malha de terra e o condutor central.

Segundo [3], a descarga parcial pode ser associada à um pulso de corrente ou de tensão que se propaga pelo cabo assim que a descarga parcial acontece. É possível detectar os pulsos produzidos por um evento de descarga parcial, por meio de sensores, e associá-los à carga aparente correspondente em pico Coulombs por meio da calibração. A calibração consiste em injetar valores conhecidos de carga nos terminais do cabo, e fazer a medição usando detectores [7]. Se for considerada razoável linearidade entre a corrente medida e a carga correspondente, pode ser inferido o valor de carga elétrica da descarga parcial. Fatores como a atenuação existente no processo de injeção do sinal e sua decorrente medição fazem com que esse processo não seja definitivo. Ainda assim, em testes em que os cabos possuem menos de 10 metros [7], esse procedimento pode ser usado, dada a pouca atenuação nessa situação.

Os pulsos de descarga parcial produzidos nos pontos defeituosos se propagam para ambas as extremidades dos cabos, podendo sofrer reflexão [8]. Na medição em uma das extremidades do cabo, pode ser verificado que o pulso original é seguido de pulsos menores, se tratando de reflexões sucessivas. O estudo das reflexões vistas é importante para localizar o ponto de ocorrência, uma vez que a distância entre

a extremidade e o defeito pode ser calculada através do tempo entre o pulso original e a primeira reflexão.

Os tipos de DP de interesse para caracterização da confiabilidade dielétrica são as descargas interna e de superfície. As descargas do tipo Corona, que ocorrem nos pontos de conexão de equipamentos de média a alta tensão [9] não são críticas, embora possam fazer barulho e ser facilmente identificáveis devido à luz que emitem. Já as descargas internas e de superfície podem ser especialmente mais degradantes para o cabo, com magnitudes de carga aparente dependentes da frequência e do tamanho da cavidade que constitui o defeito [2]. Os tipos de descarga parcial podem ser estudados de acordo com o padrão PRPD (Phase Resolved Partial Discharge), que destaca as ocorrências de descargas parciais de acordo com a fase da tensão nominal presente no cabo. Segundo [10], esse tipo de informação sobre os pulsos de DP é importante na diferenciação dos tipos de defeitos, sendo possível verificar agrupamentos específicos ao longo do ciclo da senoide.

### *b – Sensores Invasivos e Não Invasivos*

Os meios convencionais de medição de descargas parciais são muito úteis para verificação de problemas em cabos que acabaram de ser fabricados, embora não o sejam em campo, dada a necessidade de desconexão com o restante da planta para que seja efetuada a medição. Essa necessidade de desenergização do sistema, torna esse um método invasivo.

Sensores não invasivos são preferíveis em campo, uma vez que são detectores de sinais que não interferem no processo a ser medido, seja de maneira química, física ou elétrica. Além de garantir a continuidade do funcionamento do sistema, o uso em laboratório garante captura de dados fidedignos ao esperado em campo.

Tomando como base esses fatores, é recomendado o uso de um Transformador de Corrente de Alta Frequência (HFCT) [11] para medição dos pulsos de descarga parcial e de uma bobina de Rogowski [5] para medição da onda de tensão nominal. A figura 1 mostra um HFCT da Techimp, usado nesse trabalho.

Figura 1: HFCT da marca Techimp



Em contraparte aos sistemas de medição não invasivos propostos para a implementação desse trabalho, a norma IEC60120 [3] cobre os meios de medição em laboratório, feitos de maneira controlada. Esses métodos, ditos

convencionais, são feitos em cabos energizados com fonte de alta tensão controlável, usando-se de um capacitor de desacoplamento em um divisor capacitivo para que seja feita a captura apenas dos pulsos de descarga parcial. A medição é feita no condutor do cabo, conectado ao divisor capacitivo.

### III. METODOLOGIA

Como escopo desse trabalho, foi proposta a construção de um hardware, denominado DP IoT, capaz de digitalizar os sinais de descarga parcial provenientes dos sensores acoplados ao cabo. A norma IEC60270 [3] traz em seus anexos uma recomendação de construção de sistema para aquisição de dados de descargas parciais, sendo dividido em três blocos distintos: circuito de condicionamento de sinal, conversor analógico digital e central de processamento dos dados.

Tendo em mente a recomendação, espera-se que o circuito atenda aos seguintes requisitos mínimos de projeto, vistos na Tabela 1.

Tabela 1: Requisitos de Projeto

Taxa de aquisição mínima	60MHz
Resolução mínima do ADC	12 bits
Canais de alta frequência	3
Canais de baixa frequência	1
Protocolo de comunicação	LVDS
Tipo de entrada analógica	Diferencial

A taxa de aquisição de dados escolhida foi de 125 MHz, cobrindo com folga a banda de passagem do HFCT escolhido para medição, que é de 30MHz. Quatro canais foram projetados, sendo 3 para medição de pulsos de DP e um para medição da tensão CA do cabo. Todos os canais desenvolvidos para conversão de sinais possuem relativa resistência à ruído, graças ao condicionamento diferencial na entrada do conversor analógico-digital. Nesse trabalho, optou-se por apresentar apenas as formas de onda dos sinais de descarga parcial, coletados nos primeiros três canais.

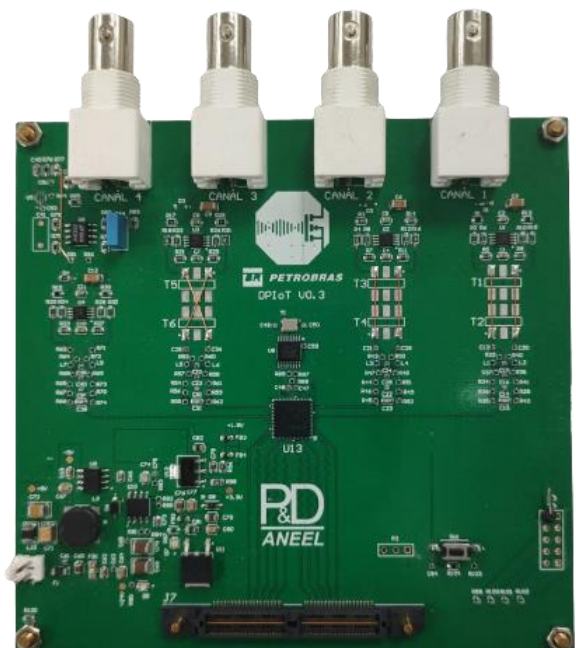
Além disso, também foi proposto um filtro diferencial que limita a banda do sinal de entrada a 30MHz, o que evita a ocorrência de Aliasing. O filtro, bem como as trilhas para passagem do sinal, deve ter as impedâncias casadas à entrada do ADC, evitando atenuação indesejada do sinal.

O ADC escolhido possui 12 bits, atendendo o requisito mínimo de resolução.

Uma vez construída a plataforma, os dados digitalizados devem ser enviados ao computador para avaliação. Para isso, o hardware construído é conectado à uma FPGA, para que seja feito o processamento e conversão dos dados no padrão LVDS para o padrão USB, facilitando a troca de informações com o computador.

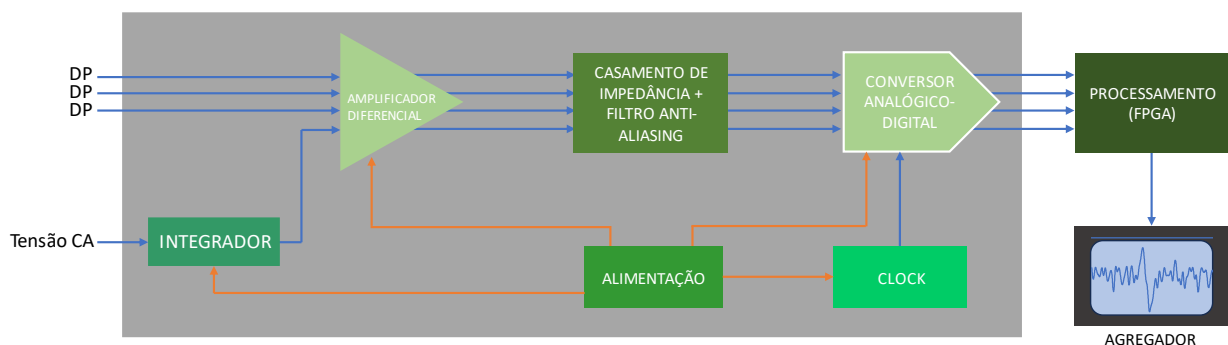
Para avaliação dos pulsos de descarga parcial, é feita a exportação dos valores para o formato CSV, tornando possível a plotagem e análise dos dados em qualquer software gráfico. Essa abordagem também torna possível a filtragem dos dados, por meio de filtros digitais. Na figura 2, pode ser visto o sistema implementado.

Figura 2: Hardware DP IoT implementado.



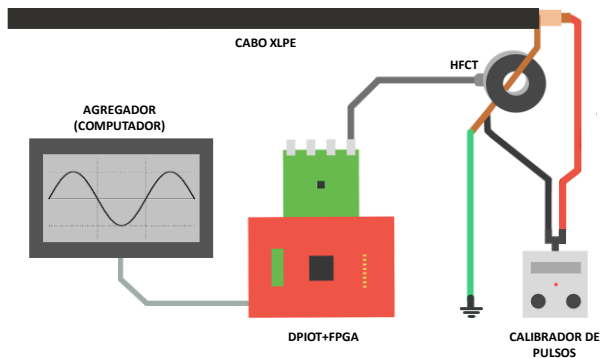
De maneira a simplificar o sistema, que condiz com o apresentado na norma, tem-se o esquema da figura 3. A área em cinza representa o escopo do que foi projetado.

Figura 3: Diagrama de Blocos do Sistema Proposto.



As medições foram feitas usando o HFCT acoplado à uma derivação da malha de terra do cabo. Para produzir pulsos de descarga parcial artificiais, foi usado um calibrador de pulsos da Techimp, conectado entre a fase e o terra do cabo a ser analisado. Na figura 4, está esquematizada a forma de medição.

Figura 4: Esquema de medição usando o HFCT.



Como forma de comparação, foram feitas medições usando um dos meios convencionais, seguindo o método principal da norma IEC60270 [3].

#### IV. RESULTADOS

Uma vez feita as medições, os dados obtidos foram tratados e plotados usando um software gráfico. Como consta nos requisitos de projeto, a resolução do ADC deve ser de no mínimo 12 bits, garantindo a aquisição fiel dos dados. Mesmo assim, é ideal que a resolução seja ainda maior.

No presente caso, mantendo a resolução mínima, foi feito o processamento dos dados de maneira a suavizar a curva obtida. Para isso, usou-se do recurso de interpolação cúbica, com dez mil pontos.

Na figura 5 pode ser visto o gráfico obtido usando o HFCT acoplado à malha de terra do cabo, e na figura 6, seu respectivo espectro de magnitude. Todas as medidas foram feitas mantendo o calibrador de pulsos em 800 pC.

Figura 5: Sinal de DP de 800pC medido com HFCT

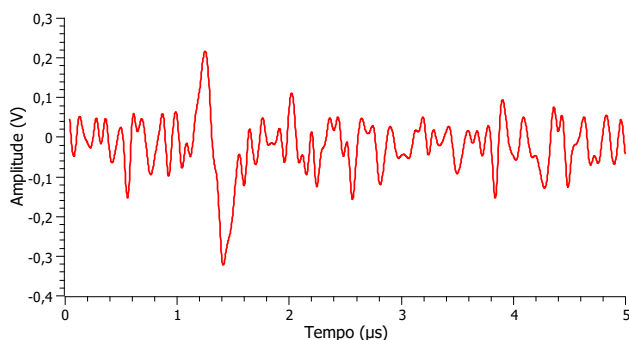
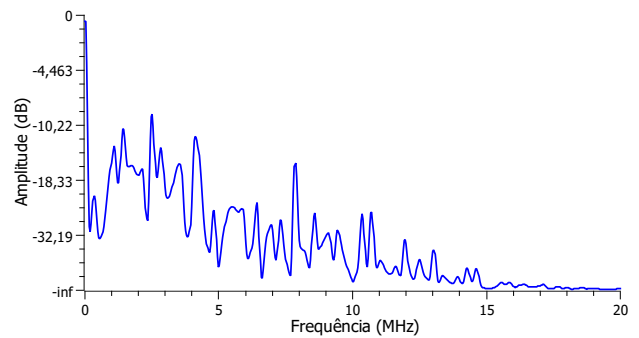


Figura 6: Espectro de Magnitude de DP de 800pC medido no HFCT



Mantendo a montagem, foi realizada nova medição no mesmo canal do DPIoT, dessa vez, usando um divisor capacitivo, como indica a norma IEC60270 [3]. Nas figuras 7 e 8, pode ser visto o pulso capturado e seu respectivo espectro de magnitude.

Figura 7: Sinal de DP de 800pC medido com divisor capacitivo

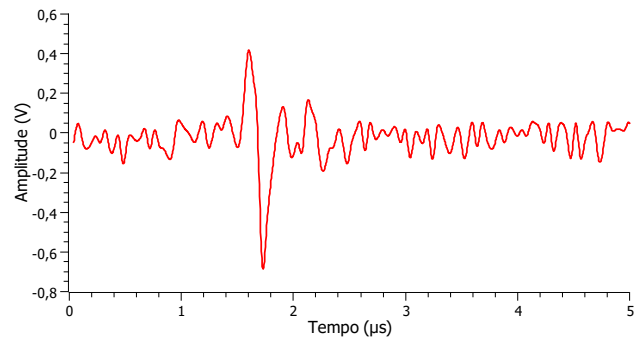
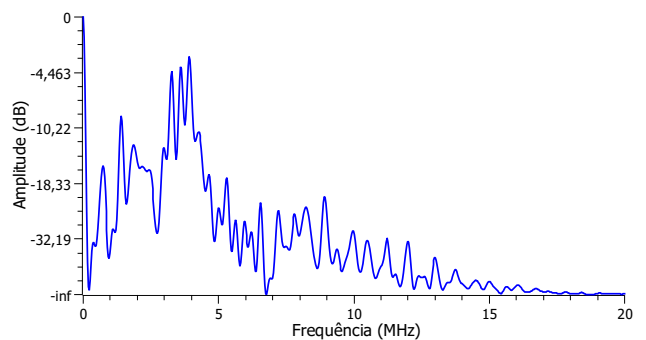


Figura 8: Espectro de magnitude de DP de 800pC medido com divisor capacitivo



Pode-se observar que em ambas as medições foi possível verificar nitidamente o pulso de descarga parcial de 800pC. No entanto, fica claro que na medição feita usando a norma, a amplitude do sinal é maior, tornando-o mais resistente à ruídos advindos da rede de alimentação do cabo.

De fato, a relação sinal ruído calculada para a medição com o divisor capacitivo é de 16,05 dB, contra os 7,41dB da medição com o HFCT. Essas medições condizem com o que a literatura diz, a respeito da baixa SNR do HFCT.



Pode-se perceber após uma análise do espectro dos sinais, que a maior parte da energia de ambos se encontra em frequências de até aproximadamente 6MHz. Filtrando ambos os sinais com frequências de corte nesse valor, obtém-se os gráficos vistos nas figuras 9 e 10.

Figura 9: Sinal de DP de 800pC medido com HFCT filtrado em 6MHz

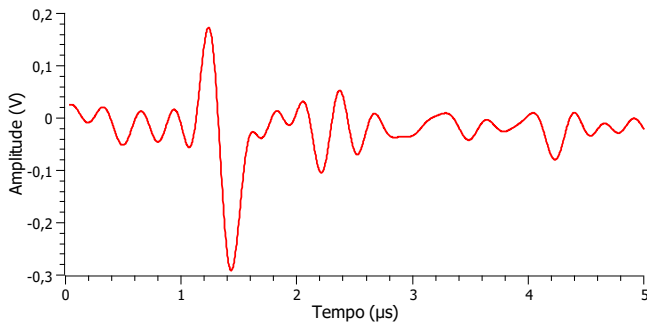
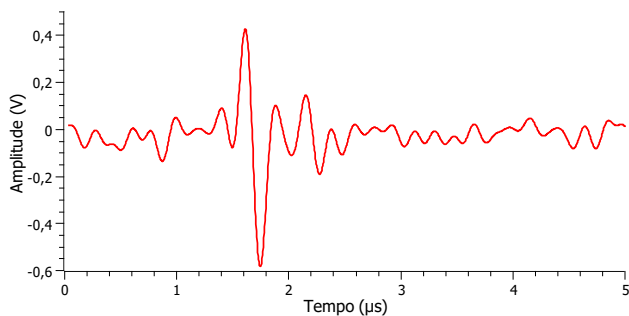


Figura 10: Sinal de DP de 800pC medido com divisor capacitivo filtrado em 6MHz



Para ambas as curvas, foi possível reduzir sensivelmente a amplitude do ruído, sem necessariamente reduzir o sinal de interesse. Isso garantiu um aumento da SNR para as duas situações: 15,33dB para a medição com o HFCT, e 22,71dB para a medição com o divisor capacitivo.

## V. CONCLUSÕES

Através do presente trabalho, foi possível verificar a eficácia do sistema de aquisição de dados proposto, especialmente, no que diz respeito à utilização de um sensor não invasivo, tal qual o HFCT. O Sistema se mostrou capaz de realizar medições para ambos os métodos (convencional e não-convencional), demonstrando especialmente a sua capacidade com relação ao método não-convencional escolhido.

Os dados obtidos com as medições, condizem com sistemas de aquisição comerciais, embora ainda haja a necessidade de aperfeiçoamento.

Espera-se no futuro, que o nível de ruído possa ser drasticamente reduzido, através de técnicas mais avançadas de pós processamento, de acordo com o tipo de ruído esperado.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao LRI – Laboratório de Redes Inteligentes - UFU, pela infraestrutura cedida para a realização deste trabalho. De maneira igual, os autores agradecem à Petrobrás, financiadora deste projeto, inscrito com o código FEELT.PETRO.001 através da Fundação de Apoio Universitário – FAU.

## REFERÊNCIAS

- [1] BAYINDIR, R; COLAK, I; FULLI, G; DEMIRTAS, K. Smart grid technologies and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 66, 2016, Pages 499-516.
- [2] GOVINDARAJAN, S; MORALES, A; ARDILA-REY, J; PURUSHOTHAMAN, N; A review on partial discharge diagnosis in cables: Theory, techniques, and trends, *Measurement*, Volume 216, 2023.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR IEC 60270: Técnicas de ensaios elétricos de alta-tensão —Medição de descargas parciais. Rio de Janeiro, 2017.
- [4] YUAN, Y; PENG, H; LI, H; Robust on-line partial discharge measurement of 35-kV cables in wind farms via dual sensors, *Energy Reports*, Volume 9, Supplement 1, 2023.
- [5] SAMIMI, M. H; MAHARI, A.; FARAHNAKIAN M. A.; MOHSENI, H. "The Rogowski Coil Principles and Applications: A Review," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 651-658, Feb. 2015.
- [6] ROJANASUNAN, W; CHANCHAROENSOOK, P; JEENMUANG, S; MONGKOLSATITPONG, S; PATTANADECH, N; SUKSAWAT, D. "The Effects of Coupling and Grounding on the Partial Discharge Pulse Propagation in the Underground Cable," 2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Kitakyushu, Japan, 2022.
- [7] MONTANARI, G; CAVALLINI, A; "Partial discharge diagnostics: from apparatus monitoring to smart grid assessment," in *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 29, no. 3, pp. 8-17, May-June 2013.
- [8] M. SHAFIQ, M; KIITAM, I; TAKLAJA, P; KÜTT, L; KAUHANIEMI, K; PALU, I. "Identification and Location of PD Defects in Medium voltage Underground Power Cables Using High Frequency Current Transformer," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 103608-103618, 2019.
- [9] JUNTASORN, T; CHANCHAROENSOOK, P; PATTANADECH, N. "Partial Discharge Pulse Propagation in Coaxial Cable," 2022 8th International Conference on

Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST), Chiang Mai, Thailand, 2022.

[10] GOETZ, D; PUTTER, H; PETZOLD, F; MARKALOUS, S. "PD characteristics under the aspect of different voltage wave shapes and frequencies," 2016 Diagnostic of Electrical Machines and Insulating Systems in Electrical Engineering (DEMISEE), Papradno, Slovakia, 2016.

[11] WU, M; CAO, H; CAO, J; NGUYEN, H; GOMES, J; KRISHNASWAMY, S; "An overview of state-of-the-art partial discharge analysis techniques for condition monitoring," in IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 31, no. 6, pp. 22-35, November-December 2015.