

## Análisis de dos tipos de mediciones de Descargas Parciales utilizando el método estadístico

FIGUEROA, Fernando\*†, GARCÍA, José Miguel, TORRES, Jacinto y ZÚÑIGA, Mónica E.

*Instituto Tecnológico Superior de Irapuato.*

*Comisión Federal de Electricidad - Laboratorio de Pruebas a Equipos y Materiales (LAPEM)*

*Instituto Tecnológico Superior de Abasolo*

Recibido Marzo 30, 2016; Aceptado Mayo 28, 2016

### Resumen

En este artículo se propone analizar dos tipos de mediciones de descargas parciales en cables subterráneos de alta tensión (CSAT) utilizando el método estadístico. La presencia de descargas parciales en el contorno del CSAT permite evaluar la degradación de su aislamiento y según el tipo de descargas parciales que se presenten puede lograrse predecir y evitar futuras fallas en el cable. Debido a que el aislamiento es uno de los componentes más importantes del cable en la presente investigación se propone un estudio comparativo entre el método oscilante y normal con el objetivo de medir e interpretar las cargas parciales. El estudio comparativo y el procesamiento de datos de las mediciones se realizan en el software MATLAB® con resultados prometedores.

**DP (Descargas Parciales AC (Corriente Alterna), DAC (Corriente Alterna Amortiguada), HV (Alto Voltaje), KV (Kilo Volts)**

### Abstract

In this paper we propose to analyze two types of partial discharge measurements in high voltage underground cables (CSAT) using the statistical method. The presence of partial discharges in the contour of the CSAT allows to evaluate the degradation of its isolation and according to the type of partial discharges that are presented can be able to predict and avoid future faults in the cable. Because insulation is one of the most important components of the cable in the present investigation, a comparative study between the oscillating and normal method is proposed with the objective of measuring and interpreting partial loads. The comparative study and data processing of the measurements are performed in MATLAB® software with promising results.

**PD (Partial Discharge), AC (alternating current), DAC (alternating current cushioned), HV (High Voltage)**

**Citación:** FIGUEROA, Fernando, GARCÍA, José Miguel, TORRES, Jacinto y ZÚÑIGA, Mónica E. Análisis de dos tipos de mediciones de Descargas Parciales utilizando el método estadístico. Revista de Sistemas Experimentales. 2016, 3-7: 1-9.

\* Correspondencia al Autor (Correo electrónico: fernando.figueroa@itesi.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer Autor.

## Introducción

En la actualidad el uso de la energía eléctrica, es cada vez más indispensable para la vida diaria del ser humano, por consiguiente es necesario generarla de una manera eficiente y sin fallas.

Debido a la necesidad de energía eléctrica se han construido grandes distancias de líneas aéreas para satisfacer la demanda. No obstante actualmente se utiliza con mayor frecuencia las instalaciones subterráneas para energizar complejos ecoturísticos, islas y grandes parques industriales. Generalmente los cables eléctricos de alta tensión están cubiertos por materiales de polímero aislante, como es el (XLPE).

Sin embargo, el material aislante puede degradarse debido a los químicos, los esfuerzos mecánicos y la alta tensión que se presentan en el sistema por fallas y fenómenos transitorios [4]. Una forma eficiente para medir la degradación del aislante de cables subterráneos de alta tensión (CSAT) originado por alta tensión (HV), es cuantificar y clasificar las descargas parciales (DP) que se presentan en el aislamiento del mismo. Las DP indican la presencia de degradación y defectos del aislante. Por lo general, se dividen en tres grupos diferentes según sus orígenes:

1. - DP Corona – Ocurre en gases o líquidos causados por la concentración de campos eléctricos en los puntos filosos de los electrodos.

2.- Descargas Internas – Ocurre dentro de una cavidad que está rodeada completamente por un material de aislamiento; podría ser en forma de huecos (por ejemplo, papel-cables), entre laminado (por ejemplo, en el aislamiento laminado) o grietas (por ejemplo, el estrés fatiga).

3.- Descargas de superficie – Se produce en la superficie de un aislamiento eléctrico donde el campo tangencial es alto, por ejemplo, arrollamientos de extremo de los devanados del estator. [1]

En el presente artículo se propone analizar dos tipos de descargas parciales en cables subterráneos de alta tensión, además se realiza un estudio comparativo entre el método oscilante y normal para la interpretación estadística de los dos diferentes métodos.

## Antecedentes

El tipo y clase de descargas parciales en una cavidad dentro de un material sólido dieléctrico depende principalmente del tamaño, la forma y la ubicación de la cavidad. Estos factores físicos tienen una fuerte influencia en la distribución del campo eléctrico local, que afecta directamente a la actividad de la DP y su comportamiento característico [5-9]. Forssen hizo un estudio experimental de la actividad de la DP en cavidades cilíndricas dentro de un material dieléctrico, donde encontró que existen menos eventos de DP por ciclo para los tamaños más pequeños de la cavidad. Cabe mencionar que la cavidad estaba limitada por un electrodo en lugar de ser completamente rodeado de aislamiento [10-11]. En el caso de una cavidad delimitada por un electrodo, los patrones de fase de DP que se midieron mostraron una asimetría entre DP positivas y DP negativas. Sin embargo, la carga aparente total por ciclo aumentó directamente de forma proporcional al diámetro de la cavidad; esto puede estar asociado con el tamaño de avalancha desarrollado durante un evento de descarga. Otros investigadores han demostrado que las cavidades de diferente forma en un material dieléctrico influyen a las DP. De las formas de cavidades más significativas que se han estudiado son esférica, elipsoidal, cilíndrica, y cavidades cuboides [3].

## Marco teórico

Las pruebas de amortiguamiento en corriente alterna (CA) se pueden utilizar como una simple prueba de resistencia o en combinación con mediciones de DP. De acuerdo a los estándares internacionales para pruebas de cables de potencia, se utilizan como referencia los siguientes documentos:

- (1) IEC 60060-3: Técnicas de prueba de alta tensión- Parte 3: Definición y requerimientos para alguna prueba,
- (2) IEEE 400: Guía para las pruebas de campo y evaluación del aislamiento de sistemas de cable de potencia blindados.
- (3) IEC 60840: Cables de potencia con aislamiento extruido y accesorios para tensiones nominales de aproximadamente 30 kV hasta 150 kV - Requisitos y métodos de prueba, y
- (4) IEC 62067: Cables de potencia con aislamiento extruido y sus accesorios para tensiones nominales de aproximadamente 150 kV ( $U_m=170$  kV) hasta 500 kV ( $U_m=550$  kV)- Requisitos y métodos de prueba.

Los parámetros de las pruebas de cables según su tipo son:

Niveles de tensión de prueba máximos en cables subterráneos.

- 1) Cables MV (6-35 kV) hasta  $2.0 U_0$ ,
- 2) Cables HV (36-150 kV) de  $1.7$  a  $2.0 U_0$ ,
- 3) Cables EHV (150-230 kV) de  $1.4$  a  $1.7 U_0$ ,

## Características de las descargas parciales

La descarga parcial se identifica como un factor principal que contribuye al deterioro del aislamiento en equipos de alto voltaje (HV).

Las fallas en los dispositivos y equipos de HV debido a este fenómeno de DP pueden causar daños y pérdidas millonarias a los servicios públicos de energía eléctrica, ya que pueden interrumpir el sistema eléctrico nacional. Esto ha llevado a emplear medición de DP como un método de diagnóstico de aislamiento para equipos de HV incluyendo cables de alimentación.

Hay muchos factores que deben considerarse durante el funcionamiento de un cable de alimentación tales como la temperatura, la posibilidad de sobretensiones eléctricas, las fuerzas mecánicas y condición adversa del suelo, que contribuyen al envejecimiento de material aislante [1-19-20].

De acuerdo a lo anterior lo que se busca es una obtención de datos claros y confiables para medir adecuadamente DP dependiendo del tipo que se presenten analizar, para lograr este objetivo en este trabajo de investigación se desarrolló un prototipo que contiene los tres tipos de DP, con la finalidad de poder analizar el problema de una manera clara y eficiente.

Por otra parte, se utilizan cables comerciales de alta tensión porque están diseñados para soportar niveles de tensiones de 115 kV, 200kV, 400kV y 600kV, además en los CSAT es donde se presentan con mayor frecuencia las DP.

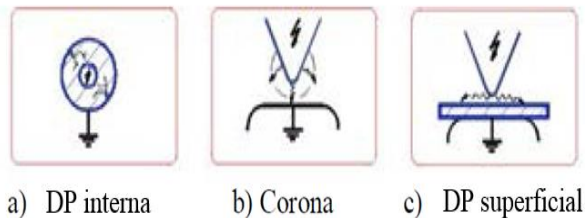
La importancia de la presente investigación estriba en determinar la degradación del aislamiento del cable para programar un plan de mantenimiento preventivo logrando incrementar la vida útil de los conductores y ahorrar dinero en reparaciones o nuevas redes eléctricas y poder evitar fallas en la mayor medida de posible [22-23].

## Metodología

Una vez que se conoce las bases y fundamento de las DP y la forma en que estas afectan los aislamientos, se propone ahora mostrar los métodos de medición de las mismas, entre los que se encuentran el método normal o tradicional y el método oscilante.

En la Figura 1 se muestra el esquema del prototipo que se utilizó para las diferentes mediciones de DP que se pueden presentar en un cable y que son medidos utilizando ambos métodos.

En el inciso “a” se observa que el material aislante ya contaba con una burbuja en su interior, en el inciso “b” se encuentra el efecto punta el cual genera el efecto corona, y por último en el inciso “c” se le realizaron algunas imperfecciones en la superficie de aislamiento provocando una DP superficial.



**Figura 1** Prototipo de las diferentes DP

Para obtener las mediciones de las DP utilizando el método normal se utilizó un equipo especial para la adquisición de datos como se muestra en la Figura 2.



**Figura 2** Equipo de medición de DP

Para poder generar las descargas parciales en el cable utilizó una fuente del orden de HV (Figura 3) que es monitoreada para entregar 75 kV y es controlada por un regulador de tensión como se muestra en la Figura 4. El regulador se encarga de mantener el nivel de voltaje adecuado para las pruebas.



**Figura 3** Fuente de voltaje utilizada en el método normal para medición de DP



**Figura 4** Regulador de tensión

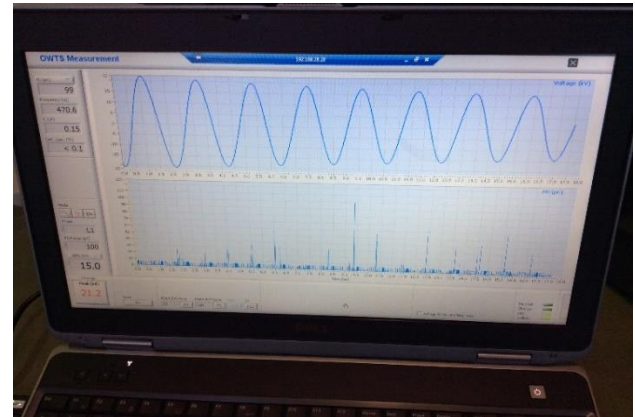
El método oscilante es similar al método tradicional, solo que el equipo es portátil, ver Figura 5.

La fuente disminuye la magnitud del voltaje, pero mantiene una onda senoidal en la misma frecuencia de 60Hz y oscila ofreciendo una corriente alterna, con la finalidad de trabajar bajo los mismos principios al momento de obtener las mediciones.



**Figura 5** Fuente de voltaje utilizada en el método oscilante para medición de DP

La forma en que se obtuvo el valor de las descargas fue por un medio computarizado como se muestra en la Figura 6.



**Figura 6** Software de medición de DP oscilante

El equipo de cómputo ofrece una medición del voltaje en kV y la DP en picocoulombs en el momento en que el medidor captura la presencia de alguna descarga parcial, como se observa en la Figura 6. Los datos son almacenados en un documento txt, para procesar las matrices en el análisis estadístico con el apoyo del Software MATLAB<sup>®</sup>.

Para el análisis estadístico se utilizaron las siguiente formulas:

$$\text{Media } \bar{X} = \frac{\sum x}{n} \quad (1)$$

$$\text{Varianza } \sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \mu)^2 f(x_i)}{\sum f(x_i)} \quad (2)$$

$$\text{Sesgo } S_k = \frac{\sum (x_i - \mu)^3 P_i}{\sigma^3} \quad (3)$$

$$\text{Curtosis } K_u = \frac{\sum (x_i - \mu)^4 P_i}{\sigma^4} - 3 \quad (4)$$



$$\text{Factor de asimetría } Da = \frac{N^+ \sum qi^-}{N^- \sum qi^+} \quad (5)$$

$$\text{Factor de correlación } r = \frac{N \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{[N \sum x^2 - (\sum x)^2][N \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (6)$$

Del análisis que se desarrolla en el software MATLAB<sup>®</sup> se obtuvo los resultados de cada método y tipo de DP que se presenta en la Figura 1. En la Tabla 1 se presenta la comparación detallada de los dos métodos de medición.

PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE LOS DOS DIFERENTES METODOS DE MEDICIÓN							
METODOS DE MEDICIÓN	TIPO DE DESCARGA	ANÁLISIS ESTADÍSTICO EN MATLAB					
		MEDIA	VARIANZA	Sk (SESGO)	FACTOR DE CORRE.	FACTOR DE ASIMETRÍA	CURTOSIS
OSCILANTE	CORONA	2.5442	27.1492	3.4944	0.2262	2.3774	16.5593
	INTERNAS	1.2330	4.5880	1.9676	0.1187	0.7583	6.9141
	SUPERFICIAL	1.3654	5.1270	1.5665	0.0029	0.8560	4.2157
NORMAL	CORONA	-26.586	2825.2	0.5956	0.0274	113.8133	1.7576
	INTERNAS	-0.8633	37.0645	-0.513	0.4542	-1.8775	7.8219
	SUPERFICIAL	41.5008	1583700	-0.737	0.7425	-8.191	3.8283

**Tabla 1** Comparación de los resultados estadísticos entre el método oscilante y normal

### Comparación entre los tres diferentes orígenes en cada una de sus presentaciones

**Método Oscilante.** – El efecto corona presenta una media de 2.5452 a comparación con la interna con 1.2330 y la superficial de 1.3654, el efecto corona se presenta con mayor impacto, aunque cabe mencionar que también tiene una mayor varianza en los datos y que le afecta para fines prácticos de credibilidad para reconocer al efecto corona como el origen más fuerte de las DP.

En seguida se compara el sesgo, donde se encuentra una dispersión mucho más notoria en el efecto corona con respecto a la media, por lo que se obtiene un valor de la media mucho más abierto que en los otros dos orígenes.

En la Curtosis, el valor más grande se alcanza por el efecto corona lo que proyecta una mayor repetitividad de valores iguales a la media. Ahora en el factor de asimetría, como debía de esperarse el efecto corona tiene una mayor tendencia entre los datos positivos y negativos, esto se debe a la forma en que es referenciado para su medición, por lo que se podría descartar esta y solo comparar los otros dos orígenes restantes donde las superficiales tienen un valor más pequeño presentando igualdades en ambos ciclos tanto positivos como negativos.

Para el factor de correlación, se tiene una correlación negativa pero mayor al efecto corona con lo que nos asegura una repetitividad entre la magnitud de la descarga y la tensión aplicado en el tiempo.

**Método Normal.** – El efecto superficial tiene un valor mayor en la media, por encima del efecto corona y el efecto interno, aunque de la misma manera una mayor varianza entre los datos obtenidos, con lo que tenemos una mayor dispersión contra la media, esto se refleja con datos muy grandes o muy pequeños alrededor de la media.

Dentro del sesgo, se tiene lo siguiente, una inclinación mayor hacia el lado izquierdo de la campana en el efecto interno y superficial y una inclinación hacia el lado derecho para el efecto corona. De la comparación de los tres efectos partiendo de 0 como referencia el efecto superficial presenta una mayor dispersión.

Para la curtosis, con un valor de 7.8219 se presentan las DP con efecto interno como la mayor entre los tres tipos de orígenes, lo cual representamos como una condición de amplitud de datos con respecto a la media.

Factor de asimetría, se encuentran todos negativos, despreciando al efecto corona encontramos con mayor cantidad al efecto interno. Factor de correlación, tenemos con un 0.7425 al efecto superficial muy cercano a la correlación positiva perfecta, lo que nos dice que se presenta la misma magnitud de la descarga en el mismo tiempo dentro de la onda de voltaje aplicada.

1.-Media. - En el método de medición normal se encuentra un valor mucho más grande que en el método oscilante, se tiene un valor de DP por efecto superficial muy alto, que es lo que se esperaría.

2.-Varianza. - En el método de medición normal se encuentran valores muy grandes de varianza en los datos, en cambio los valores de la medición oscilante son pequeños con lo que se puede concluir que los datos son más concentrados en el método oscilante y tienden hacia el mismo valor en casi todas las pruebas.

3.- Sesgo (Sk). - El efecto oscilante presenta una dispersión hacia el lado derecho en todos sus efectos, mientras que el método normal comparte una dispersión con respecto a la media, pero de ambos lados, arrojando resultados negativos y positivos.

4.-Curtosis. - Teniendo una variación notoria se observa que, en el método oscilante, en el efecto corona con un valor de 16.5593 se presenta una mayor repetitividad del valor de la media en las mediciones obtenidas.

5.-Factor de Asimetría. - Como en este factor depende la conexión realizada en el caso del efecto corona, se despreciará y solo se compararán los otros dos efectos en ambos métodos de medición. Con ello se tienen valores más grandes en ambos casos para el método normal, aunque de valor negativo, lo que nos dice que existe una mayor tendencia entre datos negativos para este método.

6.- Factor de Correlación. - Presentando para el efecto superficial e interno un valor mayor en el método normal se puede definir una mayor tendencia y relación entre la magnitud de las descargas y el tiempo de la onda de voltaje que en el método oscilante. Por otro lado, comparando el efecto corona en ambos métodos, es bueno observar un valor mayor en el método oscilante, pero con valor negativo.

### Conclusiones

De la misma manera en que se compararon los tres tipos de efectos en cada uno de los tipos de mediciones, ahora lo haremos entre cada uno de los tipos de mediciones en cada uno de sus efectos.

### Reconocimiento

A LAPEM por permitirnos observar sus mediciones, en particular al Rubén Jaramillo por todo su apoyo, del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Guanajuato (CONCYTEG) por su apoyo en la realización de este proyecto.

### Referencias

[1] Muhamad Mansor, Prodipto Sankar Ghosh & Ahmad Basri Abdul Ghani, "PD PATTERNS RECOGNITION IN XLPE CABLE UNDER VARIOUS THERMAL CONDITIONS USING STATISTICAL TECHNIQUE", November 2010.

- [2] Fauzan Baharudin, “Modelling Partial Discharges in a Solid Dielectric Material’s Cavity using COMSOL™ and MATLAB™ Software”, 6 May 2007, School of Electronics and Computer Science Faculty of Engineering, Sciences and Mathematics University of Southampton.
- [3] H. Illias, G. Chen, and P. L. Lewin, “Modeling of Partial Discharge Activity in Spherical Cavities Within a Dielectric Material” January/February — Vol. 27, No. 1, University of Southampton, United Kingdom.
- [4] Jong-Yeol Shin, Department of Car Mechatronics, Sahmyook University, Seoul 139-742, Republic of Korea, Hee-Doo Park, Jong-Yong Lee, and Jin-Woong Hong†, Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Republic of Korea “Defect Diagnosis of Cable Insulating Materials by Partial Discharge Statistical Analysis”, Received December 9 2009, Revised December 18 2009, Accepted January 15 2010.
- [5] C. Forssen, Partial discharges in cylindrical cavities at variable frequency of the applied voltage, Licentiate thesis, Royal Inst. Technol. (KTH), Stockholm, Sweden, 2005.
- [6] Weizhong Yan and Kai F. Goebel, “Feature Selection for Partial Discharge Diagnosis”, Proceedings of 12th SPIE: Health Monitoring and Smart Nondestructive Evaluation of Structural and Biological Systems IV, v. 5768, pp. 166-175, 2005.
- [7] IEEE, “Electrical Insulation”, Magazine, IEEE, volume 30 number 3, ISSN 0883-7554, pp. 27-38, May/June 2014.
- [8] WEN-YEAU CHANG, “Application of Grey Clustering Approach and Genetic Algorithm to Partial Discharge Pattern Recognition”, Department of Electrical Engineering, No. 499, Sec. 4, Tam King Road, Tamsui, Taipei 251, Taiwan.
- [9] C. Aucourt, W. Boone, W. Kalkner, R. D. Naybour, and F. Ombello, “Recommendations for new after laying test method for high voltage extruded cable systems, “CIGRE paper no. 21-105, Aug. 1990.
- [10] Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above, IEEE 400, 2011.
- [11] Power Cables with Extruded Insulation and Their Accessories for Rated Voltages Above 150 kV ( $U_m=170$  kV) up to 500 kV ( $U_m=550$  kV) Test Methods and Requirements, IEC 62067, 2011.
- [12] E. Gulski and R. Patterson, “Importance of on-site testing and diagnosis of power cables,” presented at NETA PowerTest 2011 Conference, Whashington, DC, 2011.
- [13] A. Krivda, Automated recognition of partial discharges, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 2 (5) (1995) 792–821.
- [14] T. Hong, M. Fang, Detection and classification of partial discharge using a feature decomposition-based modular neural network, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 50 (5) (2001) 1349–1354.
- [15] L. Satish, Use of hidden Markov models for partial discharge pattern classification, IEEE Transactions on Electrical Insulation 28 (1993) 172–182.



- [16] T. Abdel Galil, R. Sharkawy, M. Salama, Partial discharge pattern classification using the fuzzy decision tree approach, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 54 (6) (2005) 2258–2263.
- [17] Gorur R, Chang J, Amburgey O. Surface hydrophobicity of polymers used for outdoor insulation. *IEEE Trans Power Delivery* 1990;5:1923–33.
- [18] Kreuger F, Gulski E, Krivda A. Classification of partial discharges. *IEEE Trans Electr Insul* 1993;28:917–31.
- [19] G. O. Young, “Synthetic structure of industrial plastics (Book style with paper title and editor),” in *Plastics*, 2nd ed. vol. 3, J. Peters, Ed. New York: McGraw-Hill, 1964, pp. 15–64.
- [20] Méndez Albores Raúl, “Técnicas de Medición y Localización de Descargas Parciales en Transformadores. Luz y Fuerza del Centro”. Pag 1 a la 70. Ed CFE. 2000.
- [21] Van Brunt, R. J., "Stochastic properties of partial-discharge phenomena", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 26, pp. 902-948, 1991.
- [22] Cichecki, P., Jongen, R., Gulski, E., Smit, J.J., Quak, B., Petzold, F. and Vries, F., "Statistical Approach in Power Cables Diagnostic Data Analysis", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 15, No. 6, December 2008.
- [23] Ch. Kim, T. Kondo and T. Mizutani, “Change in Partial-Discharges Pattern with Aging”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 11, No. 1, February 2004.
- [24] Ri-cheng L, Kai B, Chun D, Shao-yu L, Guo-zheng X. Study on partial discharge localization by ultrasonic measuring in power transformer based on particle swarm optimization. In: *IEEE international conference on high voltage engineering and application*, 2008 (ICHVE 2008); 2008. p. 600–3.