

Análisis de patrones de arborescencias en aislamiento XLPE con tensión eléctrica de muy baja frecuencia

Gabino. Poblano Cuéllar
Instituto Nacional de Electricidad
y Energías Limpias
Cuernavaca, Morelos
gpoblano@ineel.mx

Carlos Gustavo Azcarraga Ramos
Instituto Nacional de Electricidad
y Energías Limpias
Cuernavaca, Morelos
cgar@ineel.mx

Primo Alberto Calva Chavarria
Tecnológico Nacional de México
Benito Juárez, Ciudad de México
s_planeación@tecnm.mx

Miguel Angel Zapata Azarcoya
Instituto Nacional de Electricidad
y Energías Limpias
Cuernavaca, Morelos
maza@ineel.mx

Resumen—Se presentan los resultados obtenidos experimentalmente, del crecimiento de arborescencias en aislamiento polimérico de cables subterráneos aplicando una tensión de muy baja frecuencia (VLF). Se confirmó que los patrones de las arborescencias son dependientes de la frecuencia de la tensión aplicada; los patrones obtenidos a 60 Hz son del tipo arbusto y los obtenidos a muy baja frecuencia son del tipo ramificado. Esta última característica de las arborescencias a muy baja frecuencia supone un incremento del riesgo de rompimiento del aislamiento debido al incremento localizado de campo eléctrico debido al efecto punta de la arborescencia. Con relación al tiempo de desarrollo de las arborescencias se observó que este parámetro es ampliamente superior para las arborescencias tipo ramificadas respecto a las del tipo arbusto. Se concluye que la actividad de descargas parciales dentro de los canales de las ramificaciones y la conductividad dentro de la matriz de XLPE, son los procesos más sensibles al cambio de la frecuencia de la tensión aplicada. Con los resultados obtenidos y los fundamentos teóricos establecidos en esta publicación se pretende impactar en los procedimientos de evaluación y de diagnóstico de cables aislados con XLPE.

Palabras claves—aislamiento XLPE, patrones, arborescencias.

I. INTRODUCCION

Las fuentes de alta tensión de C.A. con frecuencia de operación en el intervalo 1Hz – 0.01Hz (VLF), ofrecen como mayor ventaja, la reducción de los requerimientos de potencia reactiva durante las pruebas de aceptación o de mantenimiento de los cables de alta tensión con aislamiento polimérico. Sin embargo, los resultados obtenidos a tensiones de prueba VLF no se pueden correlacionar con aquellos obtenidos a 60Hz. Esta problemática para el diagnóstico de la condición surge del escaso entendimiento de los fenómenos fundamentales que dan lugar a la degradación del aislamiento bajo tensiones de prueba VLF, como es el caso de los fenómenos que intervienen para la formación y crecimiento de las arborescencias eléctricas.

En la literatura se pueden encontrar investigaciones cuyo objetivo es estudiar el efecto de la frecuencia de la tensión aplicada en el intervalo 1–0.1Hz sobre las diferentes etapas de desarrollo de las arborescencias. Por ejemplo, en [1] se concluye que las etapas de formación y crecimiento de las arborescencias son afectadas por la intensidad de las DP dentro de los canales que conforman la arborescencia, lo cual muestra dependencia de la frecuencia de la tensión aplicada.

Con relación a la morfología de los patrones de arborescencias en función de la frecuencia, hay notables diferencias entre las obtenidas a baja y alta frecuencia. Para 60 Hz y frecuencias superiores, el patrón de arborescencia mayormente encontrado es del tipo arbusto. Por el contrario, cuando se disminuye la frecuencia de la tensión aplicada disminuye la densidad de ramificaciones que forman la arborescencia, obteniendo patrones del tipo ramificado. Zheng et al [2] estudiaron la relación de la estructura de las arborescencias con la frecuencia de la tensión aplicada, encontrando que a baja frecuencia las ramificaciones de las arborescencias son más delgadas, mientras que al incrementar la frecuencia las ramificaciones fueron más gruesas.

Con relación a las características fractales de los patrones de arborescencias en función de la frecuencia, en la literatura se tienen los siguientes resultados. Chen *et al* [3], investigaron la influencia de la frecuencia sobre la dimensión fractal de las arborescencias en el intervalo entre 20Hz y 500Hz, concluyendo que la dimensión fractal de los patrones no cambia significativamente al incrementar la frecuencia. En [4], se investigó la dependencia en frecuencia del rompimiento de diferentes defectos, entre los cuales se encuentra el arreglo punta – plano, formado por una aguja insertada en material polimérico. En el artículo se discutió el mecanismo de rompimiento con relación a los efectos de la frecuencia sobre el crecimiento y la dimensión fractal de las arborescencias eléctricas. El intervalo de frecuencia estudiado fue de 20Hz a 300Hz. Los resultados de la investigación referida indican que la dimensión fractal de los patrones obtenidos es menor para bajas frecuencias.

Se han realizado varias investigaciones para establecer las diferencias entre las características de crecimiento y morfología de los patrones de arborescencias para diferentes valores de frecuencia [5, 6, 7, 8]. A nuestro criterio no existe un análisis de la afectación de la baja frecuencia sobre el desarrollo de las arborescencias, que pudiera explicar las diferencias de los patrones de arborescencias en función de la frecuencia, específicamente en el intervalo VLF.

El objetivo de este artículo es dar una explicación sobre la morfología de los patrones de arborescencias en XLPE al aplicar una tensión de muy baja frecuencia. Para este fin, se determinaron diferentes parámetros que ayudaron a fundamentar de mejor manera los resultados de la investigación.

II. METODOLOGÍA

A. Elaboración de las muestras

Las muestras son secciones transversales de un tramo de cable subterráneo de media tensión a las que se les retiró la cubierta de PVC, la pantalla semiconductor exterior y la cubierta contra ingreso de agua. Posteriormente, las muestras se pulieron hasta obtener un espesor de 2.5mm para mejorar la transmisión de luz a través del material aislante y registrar apropiadamente el desarrollo de las arborescencias con un microscopio digital.

Una vez que se obtuvieron las características necesarias en las muestras, estas se calentaron dentro de un horno a una temperatura de 120°C. Al alcanzar la temperatura indicada, con ayuda de un micrómetro se insertó gradualmente una aguja en la muestra para formar el arreglo punta – plano. La separación entre electrodos fue de 1mm para todas las muestras. Para evitar el movimiento de la aguja por la expansión o contracción de los materiales metálicos por efecto de la temperatura y que se alterara la separación entre la aguja y el electrodo de tierra, después de incrustar la aguja está se desacopló del micrómetro. La muestra se mantuvo en el horno durante un lapso de 60 minutos, con la finalidad de minimizar los esfuerzos mecánicos por la incrustación de la aguja. Al finalizar el proceso descrito, la muestra se dejó enfriar a temperatura ambiente.

En la Fig. 1 se presenta el diagrama esquemático de la configuración de electrodos utilizada y en la Fig. 2 se puede observar el diámetro de una de las agujas utilizadas.

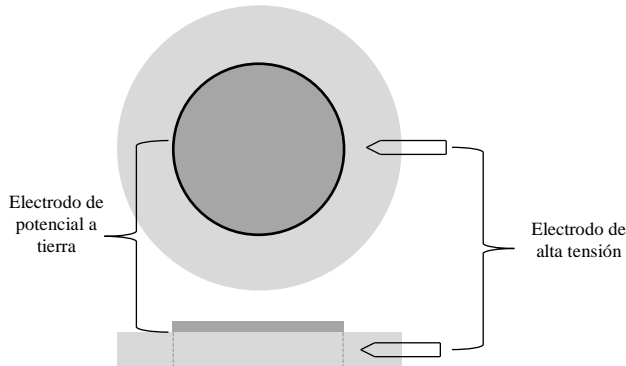


Fig. 1 Configuración de electrodos para crecimiento acelerado de arborescencias



Fig. 2 Detalle de las agujas utilizadas

B. Arreglo experimental

Para realizar el crecimiento acelerado de las arborescencias bajo condiciones controladas, se acondicionó un arreglo para aplicar la tensión de prueba a diferentes

frecuencias y en paralelo registrar en video su desarrollo. La Fig. 3, muestra esquemáticamente los componentes del arreglo experimental.

Como se indica en la Fig. 3, la muestra se coloca dentro de un recipiente de vidrio relleno de aceite para evitar el rompimiento por aire entre los componentes. Las muestras se fijan y se conectan al potencial de tierra por la parte central, la aguja se conecta a la alta tensión. En la parte superior del arreglo experimental se colocó un microscopio digital para registrar continuamente el desarrollo de las arborescencias, los videos se almacenaron en una computadora portátil para su posterior análisis. En la parte inferior del arreglo, se colocó una fuente de luz de alta intensidad para mejorar la visibilidad a través de las muestras.

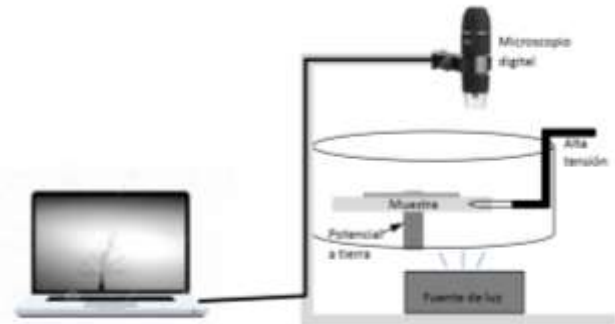


Fig. 3 Arreglo experimental para crecimiento acelerado de arborescencias

C. Procedimiento de energización

El procedimiento de prueba consistió en aplicar una tensión eléctrica de 7kVrms de corriente alterna hasta que la longitud de las arborescencias alcanzó el 50% del espacio entre electrodos. Para poder comparar los patrones de arborescencias obtenidos a baja frecuencia, se hicieron crecer arborescencias en los siguientes valores de frecuencia: 60, 30, 15, 1, 0.5 y 0.1Hz.

III. RESULTADOS

A. Etapa inicial de la arborescencia

La Fig. 4 muestra una fotografía tomada en la etapa inicial del desarrollo de una arborescencia a 0.5 Hz. Se puede identificar con gran detalle el canal principal y sus ramificaciones.



Fig. 4 Primeras ramificaciones de una arborescencia desarrollada a 0.5 Hz

B. Morfología de los patrones en función de la frecuencia

En la Fig. 5, se puede observar que el patrón típico de arborescencias a 60Hz es del tipo arbusto (Fig. 5a), cuya principal característica es la alta densidad de ramificaciones (número de ramificaciones que atraviesan el volumen del aislamiento). Los patrones obtenidos a 30 y 15Hz, muestran una menor densidad de ramificaciones, como se puede apreciar en las Fig. 5b y Fig. 5c.

En el intervalo de frecuencia de 1 a 0.1 Hz, se obtuvieron los patrones de arborescencias mostrados en las Fig. 5d a Fig. 5f. Se observa que la densidad de ramificaciones de los patrones de arborescencias en este intervalo de frecuencia es notablemente inferior en comparación con los patrones a 60Hz.

Cabe mencionar que para obtener las imágenes se tomaron cientos de fotografías de los diferentes planos de las arborescencias con ayuda de un microscopio y cámara digital, posteriormente las imágenes se procesaron utilizando la técnica de focus stacking mediante un software de licencia libre.

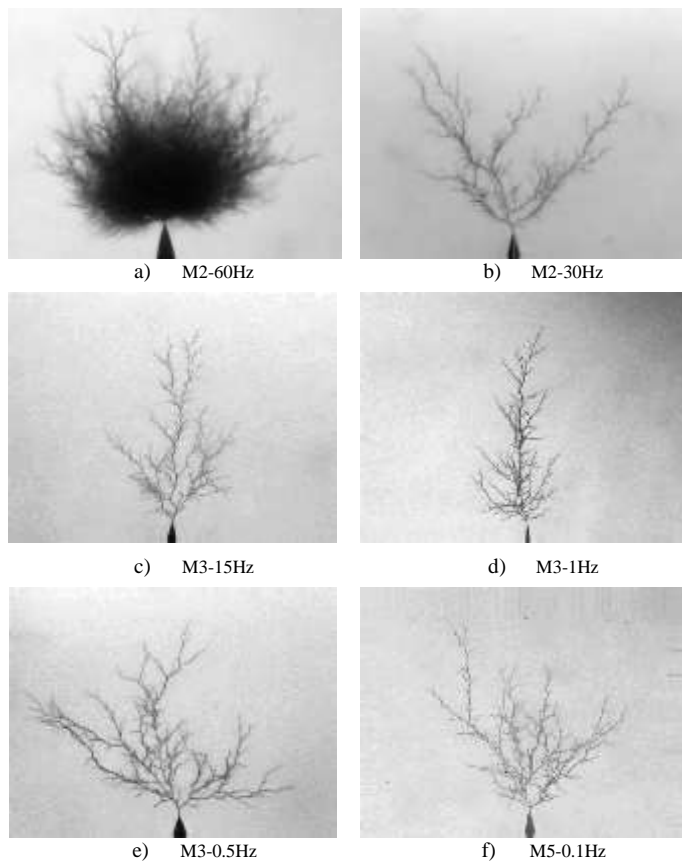


Fig. 5 Patrones de arborescencias a diferentes frecuencias de la tensión aplicada

C. Tiempo de desarrollo de las arborescencias

Como parte de la información útil para el análisis del desarrollo de las arborescencias a muy baja frecuencia, se registró el tiempo que le llevo a cada arborescencia alcanzar la mitad de la separación entre electrodos. En la Tabla I, se

presenta el tiempo promedio en desarrollar las arborescencias para cada frecuencia.

Como se puede ver en los datos de la Tabla I, conforme decrece el valor de la frecuencia de la tensión aplicada el tiempo para alcanzar la longitud deseada de las arborescencias se incrementa. Por ejemplo, para obtener el patrón de la arborescencia a 0.1 Hz de la tensión aplicada, fue necesario esperar 10,800 segundos, en cambio el patrón de la arborescencia a 60 Hz se obtuvo a los 90 segundos de aplicar la tensión de prueba.

TABLA I TIEMPO PROMEDIO PARA ALCANZAR LA MITAD DE LA DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS

Frecuencia (Hz)	Tiempo promedio (s)	Longitud final (mm)
60	90	0.5
30	420	0.5
15	800	0.5
1	3,600	0.5
0.5	5,200	0.5
0.1	10,800	0.5

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De manera general, los resultados indican una marcada diferencia de la morfología de los patrones de arborescencias en función de la frecuencia.

Como ya se demostró los patrones a muy baja frecuencia tienen menor densidad de ramificaciones. Lo anterior, indica que la actividad de descargas parciales, mecanismo precursor de las microcavidades en la matriz del XLPE, dentro de los canales que conforman las ramas de la arborescencia es menor conforme disminuye la frecuencia de la tensión aplicada. Lo anterior se puede explicar con el comportamiento de los electrones dentro del material, como se describe en [9]. En el semiciclo negativo los electrones son arrancados del electrodo negativo y acelerados hacia el interior de la matriz de XLPE, cuando la tensión cambia a polaridad positiva, la mayoría de los electrones regresan al electrodo positivo, sin embargo, algunos quedan atrapados en la matriz del XLPE. Estos electrones son acelerados por efecto del campo eléctrico aplicado, este proceso se repite hasta alcanzar la energía y la intensidad del campo eléctrico local suficiente para provocar el rompimiento de las cadenas de las moléculas, formando de esta manera las microcavidades.

En el caso de la tensión a muy baja frecuencia ocurren los cambios de polaridad e incremento de la tensión con menor velocidad, excitando con menor intensidad a los electrones. Esta característica de la onda senoidal a muy baja frecuencia hace que los electrones no tengan la suficiente velocidad ni energía para romper rápidamente las cadenas del XLPE, lo que conlleva a un proceso más lento para la formación y crecimiento de la arborescencia.

Por otro lado, la conductividad del XLPE juega también un rol importante. De acuerdo con [10], la conductividad intrínseca (σ) de un material altamente aislante como el PE es

muy baja, debido a que la energía requerida para que un electrón transite de la banda de valencia hacia la banda de conducción es muy alta, típicamente de 8.8eV. De acuerdo con el modelo desarrollado por [10], el proceso de conducción dentro del aislamiento se da por el efecto tunneling entre estados localizados. Con base en esta consideración, Baudion et al, determinaron que la conductividad en corriente alterna, $\sigma(\omega)$, dentro de la matriz polimérica cambia de acuerdo con $\omega^{0.86}$.

Por consiguiente, en este trabajo de investigación consideramos que la morfología de los patrones de arborescencias en el intervalo de 1-0.1 Hz, se debe a la disminución de la conductividad dentro del XLPE, limitando la conducción de los portadores de carga hacia ambos sentidos de flujo de la interface metal/aislamiento, en consecuencia, se tienen una menor actividad de descargas parciales y una lenta formación de las microcavidades. Lo que concuerda con los observado con la experimentación.

Con relación a los patrones de las arborescencias, se observó que el tipo arbusto se desarrolló de forma más rápida en los momentos iniciales, sin embargo, conforme aumentó la densidad de ramificaciones el crecimiento fue más lento. Lo anterior, se debe al efecto de apantallamiento del campo eléctrico local provocado por la cantidad de ramificaciones, es decir a mayor número y cercanía de las ramificaciones disminuye la intensidad del campo eléctrico local.

Para los patrones de arborescencias del tipo ramificado, cuya característica es una menor densidad de ramificaciones, el efecto de apantallamiento del campo es mínimo. De esta manera el crecimiento de este tipo de arborescencia se ve afectado únicamente por la frecuencia y la intensidad de la tensión aplicada. Es importante mencionar que en este tipo de patrones el efecto punta de las ramificaciones juega un rol importante en el incremento del riesgo de rompimiento del aislamiento.

CONCLUSIONES

- Se confirmó que la morfología de los patrones de arborescencias cambia significativamente en función de la frecuencia de la tensión aplicada. A baja frecuencia la densidad de ramificaciones es menor, haciendo que los patrones sean del tipo ramificado.
- La morfología de los patrones a baja frecuencia es indicativa de menor actividad de DP en las ramificaciones de las arborescencias. Así como una menor conductividad en la matriz del aislamiento.
- El efecto punta de los patrones del tipo ramificado incrementa el riesgo de rompimiento del aislamiento XLPE. Por otro lado, el efecto de apantallamiento en una arborescencia tipo arbusto es máximo disminuyendo el riesgo de rompimiento pero incrementando la conductividad de la región.
- El tiempo de desarrollo de las arborescencias a muy baja frecuencia es ampliamente superior en comparación con el tiempo de desarrollo a frecuencia

industrial. Esto concuerda con las hipótesis adoptadas, las cuales explican la menor actividad de descargas parciales en los canales de las arborescencias y la disminución de la conductividad en el matriz del aislamiento debido a la muy baja frecuencia de la tensión aplicada.

- Los resultados obtenidos para esta publicación pretenden fundamentar teóricamente las características de las arborescencias a muy baja frecuencia y a la vez impactar en los protocolos de evaluación y diagnóstico de cables aislados con XLPE.

AGRADECIMIENTOS

G. Poblano-Cuéllar agradece el apoyo del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias por el permiso otorgado para la realización de estudios de posgrado y al CONACYT por el apoyo económico para el desarrollo de dichos estudios de posgrado.

REFERENCIAS

- [1] E. Ildstad, K. Fauskanger and J. Holto, "Electrical treeing from needle implants in XLPE during very low frequency voltage testing", *IEEE International Conference Solid Dielectrics*, Bologna Italy, 2013, pp. 800-803
- [2] X. Zheng, G. Chen, A.E. Davies, S.J. Sutton and S.G. Swingler, "The influence of survival mechanical stress and voltage frequency on electrical tree in XLPE", *Annual Report Conference of CEIDP*, Cancun, Q. Roo. México, 2002, pp.955-958.
- [3] G. Chen and C.H. Tham, "Electrical treeing characteristics in XLPE power cable insulation in frequency range between 20 and 500Hz", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol.16, No. 1, pp. 179-188, Feb. 2009.
- [4] W. Li, J. Li, G. Yin, S. Li, J. Zhao B. Ouyang and Y. Ohki, "Frequency dependence of breakdown performance of XLPE with diferent artificial defects", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol.19, No. 4, pp.1351-1359, Aug. 2012.
- [5] R. Thiamsri, N. Ruangkajonmathee, A. Oonsivilaiand and B. Marungsri, "Effect of applied voltage frequency on electrical treeing in 22kV cross - linked polyethylene insulated cable", *Int. Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, Vol. 5, No. 12, pp.1563-1359, Jul. 2011.
- [6] M.H. Ahmad, N. Bashir, H. Ahmad, M.A. Mohamed Piah, Z. Abdul-Malek and F. Yusof, "Statistical Analysis of Electrical Tree Inception Voltage, Breakdown Voltage and Tree Breakdown time Data of Unsaturated Polyester Resin", *Journal Electrical Engineering Technology*, Vol. 8, No. 4, Dec. 2013. <http://dx.doi.org/10.5370/JEET.2013.8.4.840>
- [7] N. Yoshimura and F. Noto, "Voltage and Frequency Dependence of Bow-Tie Trees in Crosslinked Polyethylene", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*", Vol. EI-17, No. 4, pp. 363-367, Aug. 1982. [10.1109/TEI.1982.298510](https://doi.org/10.1109/TEI.1982.298510)
- [8] L. A. Dissado, S.J. Dodd, J.V. Champion, P.I. Williams and J.M. Alison, "Propagation of Electrical Tree Structures in Solid Polymeric Insulation", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 4, No.3, Jun. 1997. [10.1109/94.598282](https://doi.org/10.1109/94.598282)
- [9] Bao et al., "The initiation phenomena of electrical treeing in XLPE cable insulation," in *Proceedings of the 2012 IEEE Conf. on High Voltage Eng. and Application*, Shanghai, China, 17-20 Sept. 2012, pp 431-434.
- J.G. Simmons, "Transition from Electrode-Limited to Bulk-Limited Conduction Process in Metal-Insulator-Metal Systems", *Physical Review*, Vol. 166, No. 3, pp. 912-920, 1968.