7. Conclusiones

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral ha sido la evaluación de líneas aéreas de distribución frente al rayo. Se han tratado líneas con y sin cable de tierra.

Los resultados se pueden dividir básicamente en tres partes.

- Cálculo de sobretensiones en líneas de distribución por descargas directas a los conductores de fase y al cable de tierra si la línea está apantallada, y por descargas que caen a tierra en las proximidades de la línea. En el caso de descargas a tierra, se ha propuesto una metodología de cálculo basada en la simulación digital utilizando el programa EMTP/ATP, y los resultados obtenidos se han comparado con los obtenidos mediante el método de Chowdhuri.
- Cálculo de la tasa de contorneamientos originados por descargas atmosféricas mediante un método sistemático y un método estadístico.
- Análisis del comportamiento de líneas aéreas de distribución frente al rayo empleando redes neuronales. El entrenamiento de las redes neuronales se ha aplicado en la clasificación de descargas atmosféricas y en el cálculo de sobretensiones originadas por estas descargas. La validación de las redes neuronales se ha basado en el cálculo de la tasa de contorneamientos de manera estadística utilizando el método de Monte Carlo. Los resultados obtenidos de la validación se han comparado con los obtenidos mediante los algoritmos de cálculo empleados en el entrenamiento.

A continuación se resumen las conclusiones más importantes que se han obtenido de los diferentes estudios realizados en esta Tesis Doctoral.

Análisis de la tensión inducida en líneas aéreas de distribución por descargas a tierra

En el estudio realizado se han presentado dos métodos para calcular las sobretensiones que se inducen en una línea aérea de distribución por descargas que caen a tierra en sus cercanías

- fórmula de Chowdhuri
- simulación digital con EMTP/ATP.

Ambos métodos utilizan el modelo de Chowdhuri para representar el acoplamiento entre la línea y los campos inducidos por el rayo.

Las conclusiones derivadas del estudio son válidas tanto para líneas monofásicas como para líneas trifásicas con y sin apantallamiento.

- Se ha analizado el efecto sobre la tensión inducida de los diferentes valores que pueden adoptar los parámetros Δt y Δx . Por un lado, se ha observado que es suficiente un $\Delta t = 0.1 \mu s$ para representar de manera precisa la forma de onda de la tensión. Sin embargo, el valor del parámetro Δx se debe escoger dependiendo de la longitud del tramo de línea analizado.

- La tensión máxima inducida en una línea permanece constante a partir de una cierta distancia del punto medio. Esto significa que apenas influyen las ondas de tensión inducida que aparecen en la línea por encima de esa distancia “límite”. Se ha comprobado que para reproducir el fenómeno ha sido suficiente con utilizar una línea de unos 6 km de longitud.
- Los resultados obtenidos al calcular la tensión inducida muestran formas de onda similares ya sea utilizando la fórmula de Chowdhuri o bien mediante simulación con EMTP/ATP. Sin embargo, existen casos donde la diferencia entre los valores de pico de la tensión inducida puede llegar a ser considerable. En general, aunque esta diferencia no ha superado el 10 %, se ha comprobado su dependencia con el valor adoptado por algunos de los parámetros del rayo. Cuando aumenta la velocidad de retorno la diferencia aumenta, incluso hasta superar el 30 % con una velocidad $v = 150000$ km/s. También se ha comprobado que esta diferencia aumenta, aunque no de manera considerable, cuando disminuye el tiempo de frente de la onda de corriente del rayo.

A la vista de los resultados obtenidos, era lógico esperar ciertas diferencias entre ambos métodos puesto que el modelo de línea utilizado en cada uno es diferente. Además, la fórmula de Chowdhuri se ha obtenido para líneas de longitud infinita.

Cálculo de la tasa de contorneamientos en líneas aéreas de distribución

En esta Tesis Doctoral se han revisado una serie de procedimientos para evaluar la tasa de contorneamientos en líneas aéreas de distribución con y sin cable de tierra. Se han estudiado dos casos diferentes, teniendo en cuenta una distribución uniforme de la velocidad de retorno o bien suponiendo que la velocidad depende de la intensidad de pico de la descarga. Las conclusiones más importantes del estudio realizado son las siguientes

- las tasas de contorneamientos por descargas directas a los conductores de fase o por cebados inversos difieren mínimamente según se utilicen el Modelo Electrogeométrico o el modelo del radio atractivo
- la tasa de contorneamientos por descargas directas a los conductores de fase se anula prácticamente si se añade un cable de tierra a la línea; no obstante, para que esto ocurra el diseño de debe de realizar de manera adecuada; además, no se debe de olvidar que existirá posibilidad de fallo por cebado inverso
- el parámetro que tiene una mayor influencia en el cálculo de la tasa de contorneamientos por cebados inversos es la resistencia de puesta a tierra de los postes
- la tasa de contorneamientos por descargas a tierra varía de manera importante según se utilicen los modelos de Chowdhuri o Rusck; el modelo de tensión inducida de Chowdhuri es más complejo porque considera más variables que el modelo de Rusck; una de las variables comunes a ambos modelos es la velocidad de retorno del rayo; esta variable influye de manera diferente en ambos modelos, con el método de Chowdhuri la tasa de contorneamientos disminuye considerablemente, y con el método de Rusck aumenta moderadamente, si aumenta la velocidad de retorno del rayo; la diferencia entre los resultados obtenidos con ambos métodos se acentúa con velocidades de retorno extremas (30000 o 150000 km/s)

- la tasa de contorneamientos por descargas a tierra en líneas apantalladas difiere sensiblemente según el método empleado, aunque en todos los casos se obtiene una reducción notable
- las tasas de contorneamientos por descargas indirectas y totales calculadas con velocidad dependiente del pico de corriente y con parámetros $W = 200$ y $W = 500$ (Tabla 5.5) son comparables a las obtenidas con velocidades de retorno del rayo constantes de 150000 y 90000 km/s (Tabla 5.4); estos resultados pueden ser entendidos fácilmente si se observa la función densidad de probabilidad de la velocidad de retorno del rayo para cada valor del parámetro W , ver figura 5.9, se puede ver que el valor medio y la desviación de la velocidad disminuyen con el aumento del valor de W , y que cuando $W = 50$ la velocidad media se encuentra cercana a los 200000 km/s.

Por otro lado, se ha realizado un estudio estadístico utilizando el método de Monte Carlo en el cálculo de la tasa de contorneamientos de una línea de distribución. Las conclusiones más importantes derivadas de este estudio son las siguientes

- la tasa de contorneamientos por descargas indirectas es mayor que por descargas directas a la línea cuando el nivel de aislamiento de la línea es inferior a 50 kV, independientemente de si la distribución de velocidades utilizada es uniforme o depende de la intensidad máxima de la descarga
- la variación de la tasa de contorneamientos en función del parámetro W depende del método utilizado para evaluar las descargas indirectas; con el método de Rusck, el valor de la tasa disminuye ligeramente al aumentar el parámetro W , mientras que con el método de Chowdhuri aumenta de manera considerable, aunque algo menos si la línea se encuentra apantallada; en general, con ambos métodos esta relación se mantiene al aumentar el nivel de aislamiento de la línea, aunque con el método de Chowdhuri el aumento no es tan brusco a partir de niveles de aislamiento de 150 kV
- las tasas de contorneamientos por descargas directas a los conductores de fase e indirectas son similares cuando se calculan a partir de los diferentes métodos utilizados en el análisis sistemático (Tabla 5.5) o mediante un análisis estadístico (Tablas 5.6 y 5.7); la diferencia encontrada en la tasa de contorneamientos por cebados inversos se debe exclusivamente a que los métodos utilizados en la Tabla 5.5, expresiones (5.8) y (5.9), consideran que solo el 60 % de los impactos que caen suficientemente cerca de una torre pueden provocar contorneamiento.

Aplicación de redes neuronales en el cálculo de sobretensiones y tasa de contorneamientos

Este trabajo ha presentado la aplicación de redes neuronales en dos aspectos importantes relacionados con el estudio del comportamiento de líneas aéreas de distribución frente al rayo

- como clasificador que permita distinguir entre las descargas que impactarán en una línea y las descargas que caerán a tierra
- en el cálculo de sobretensiones atmosféricas originadas mediante los dos mecanismos que pueden provocar contorneamiento en líneas aéreas de distribución sin apantallar, y mediante los tres mecanismos que pueden provocar contorneamiento en líneas apantalladas.

Por otra parte se ha estudiado la precisión que se puede obtener en el análisis estadístico del comportamiento de líneas aéreas de distribución mediante redes neuronales, teniendo en cuenta una distribución uniforme de la velocidad de retorno y considerando que esta velocidad depende de la intensidad de pico de la descarga.

Con el primer estudio se trata simplemente de aplicar el Modelo Electrogeométrico mediante una red neuronal convenientemente entrenada. En el segundo estudio se ha incluido la clasificación de descargas y el cálculo de sobretensiones. De los resultados obtenidos se pueden deducir las siguientes conclusiones

- se ha podido obtener una arquitectura de red neuronal capaz de distinguir, con un error inferior al 1 %, entre los dos tipos de descargas atmosféricas que es necesario considerar en el estudio de líneas sin apantallar
- tanto con una distribución uniforme de la velocidad de retorno del rayo como con la velocidad en función de la intensidad y utilizando las redes neuronales entrenadas con distribución uniforme de la velocidad de retorno del rayo, ver apartados 6.3.3 y 6.3.4, el error cometido en el cálculo de la tasa de contorneamientos depende de si la línea tiene o no instalado un cable de tierra; si la línea no se encuentra apantallada, el error cometido no supera en la mayoría de los casos el 10 % si el valor del CFO es mayor que 100 kV y se utiliza el método de Rusck; con el método de Chowdhuri este error es mayor; para valores del CFO pequeños el error cometido por las redes neuronales puede ser considerable; sin embargo, si la línea se encuentra apantallada en general el error es inferior al 10 %, sea cual sea el método utilizado; además, un porcentaje de este error, alrededor del 1 %, es debido a la función de clasificación, ya que no todas las descargas fueron debidamente clasificadas
- los resultados obtenidos utilizando las redes neuronales entrenadas con la velocidad de retorno del rayo en función de la intensidad máxima, ver apartados 6.3.5 y 6.3.6, solo han mejorado con el método de Chowdhuri para líneas sin apantallar; la falta de datos necesarios para entrenar correctamente las redes neuronales ha sido la causa principal de que no se haya obtenido una mejora general; se puede decir que los resultados han mejorado con líneas sin apantallar y empeorado con líneas apantalladas.

Las ventajas del estudio realizado pueden ser puestas en duda si los algoritmos usados para entrenar las redes neuronales son simples. Incluso, con algoritmos sofisticados las ventajas pueden ser dudosas puesto que el tiempo necesario para realizar un análisis estadístico puede ser mas bien corto. Las ventajas son obvias cuando el entrenamiento está basado en medidas reales. Además, se debería de tener en cuenta que en todos los casos las redes neuronales han sido entrenadas con un número pequeño de datos dando resultados la mayoría de veces aceptables si se considera que de utilizar un número mayor de combinaciones para las entradas de las redes neuronales habrían sido necesarios millones de datos. Por ejemplo, con el método de Rusck aplicado a líneas apantalladas, ver apartado 6.3.6, se han utilizado 10800 patrones para entrenar la red neuronal. Sin embargo, si se hubieran tenido en cuenta las 108 combinaciones para las variables de entrada que componen la configuración de la línea, la intensidad del rayo de 1 kA hasta 200 kA en incrementos de 0.5 kA, la distancia entre descarga y línea desde 0 m hasta 500 m en incrementos de 5 m, y la velocidad de retorno del rayo entre un mínimo y un máximo aceptables con incrementos de 10000 km/s para cada valor del parámetro W, habrían sido necesarios más de 300 millones de datos para entrenar “correctamente” la red neuronal, lo cual es completamente inviable con los equipos informáticos actuales.

Por otra parte se puede observar que se ha utilizado la misma estructura de red neuronal, a excepción de las variables que componen las entradas, para entrenar los diferentes tipos de redes neuronales estudiados en este trabajo. Posiblemente, si se hubiera tratado cada caso por separado con el ajuste final de pesos y umbrales se hubieran obtenido mejores resultados. También se habrían obtenido mejores resultados si se hubieran utilizado diferentes arquitecturas de redes neuronales para los diferentes tipos de descargas (directas a los conductores de fase, directas al cable de tierra y directas a tierra).

Otro aspecto importante es el modelo de red neuronal utilizado. El algoritmo Backpropagation ha sido ampliamente utilizado en muchas aplicaciones, sin embargo, tiene serias limitaciones, ya que su ajuste es muy lento y no es adecuado para aplicaciones en tiempo real.