



Generador de Tesla de 1.300.000 volt

Pecorelli, Mario ⁽¹⁾

⁽¹⁾INTI-Física y Metrología

Introducción

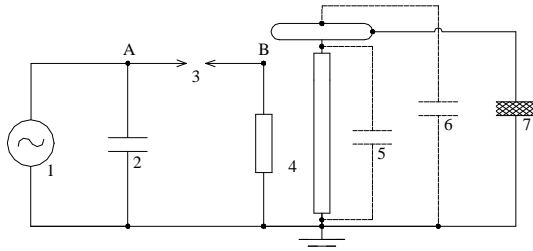
Los materiales aislantes usados en fuentes de alimentación conmutadas de alta tensión están expuestos a altas tensiones de alta frecuencia. Los ensayos de envejecimiento realizados sobre dichos materiales aislantes con altas tensiones continuas o de frecuencia industrial no pueden revelar los verdaderos efectos de envejecimiento que tienen lugar durante la operación normal a alta frecuencia.

Con el propósito de realizar ensayos de envejecimiento de materiales aislantes sometidos a altas tensiones de alta frecuencia, se estudiaron hace tiempo diferentes fuentes de tensión. Finalmente, el generador de Tesla resultó ser superior para el propósito de realizar los citados ensayos de envejecimiento.

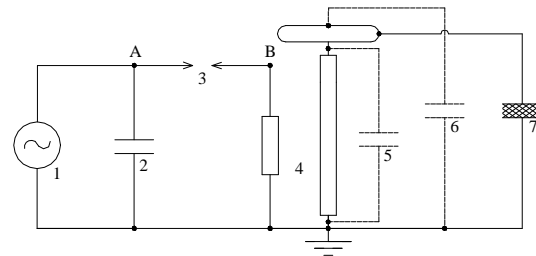
Experimentos de envejecimiento en hojas aislantes han confirmado la confiabilidad del generador de Tesla en la realización de estos ensayos ^[1].

Los generadores de Tesla pueden ser alimentados con tensión continua o alterna. El generador que se ha desarrollado en este trabajo se alimenta con tensión alterna de 50 Hz.

La Fig. 1 muestra el circuito básico del generador. La fuente de tensión alterna (1) se aplica a un capacitor (2), llamado capacitor primario, entre el punto A y tierra (ver Fig. 1). Entre el punto B y tierra se encuentra el arrollamiento primario de un transformador (4), llamado transformador de Tesla. Cuando el explosor (3) no está cebado, no circula corriente en dicho arrollamiento primario, y



(1) Fuente de tensión alterna



- (2) Capacitor primario
- (3) Explosor
- (4) Transformador de Tesla
- (5) Capacidad propia de la bobina secundaria
- (6) Capacidad del electrodo antiefluvio
- (7) Capacidad de una hoja aislante

Fig.1: Circuito básico de un generador de Tesla

Cada vez que se produce el cebado del explosor, el capacitor primario se descarga en el arrollamiento primario del transformador de Tesla (4). Este es un transformador sin hierro. Su arrollamiento primario tiene pocas espiras (a lo sumo 30), mientras que el arrollamiento secundario posee alrededor de 1.000 espiras (a veces algunos miles de espiras).

En cada descarga del capacitor primario se produce una corriente oscilatoria amortiguada en la bobina primaria del transformador. El amortiguamiento se debe a las resistencias de pérdidas primarias (resistencia de la bobina, resistencia del arco del explosor, etc.). Si llamamos L_p a la inductancia de la bobina primaria y C_p a la capacidad del capacitor primario, la frecuencia propia de oscilación f_p de la corriente primaria (sin tener en cuenta las pérdidas) viene dada por :

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C_p}} \quad (1)$$

Las corrientes oscilatorias amortiguadas del

circuito primario inducen altas tensiones oscilatorias amortiguadas en el circuito secundario. Este último circuito está compuesto por el arrollamiento secundario del transformador de Tesla (4) y el capacitor secundario, o capacitor de carga. Este último capacitor tiene una capacidad igual a la suma de tres capacidades: la propia de la bobina secundaria (5), la del electrodo antiefluvio (6) y la de la hoja aislante (7) (ver Fig. 1).

El amortiguamiento de las tensiones oscilatorias del circuito secundario se debe a las resistencias de pérdidas secundarias (resistencia de la bobina secundaria, principalmente). Si llamamos L_S a la inductancia del arrollamiento secundario y C_S a la capacidad de la carga, la frecuencia propia de oscilación f_S de la tensión secundaria (sin tener en cuenta las pérdidas) viene dada por:

$$f_S = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S C_S}} \quad (2)$$

Cuando las frecuencias f_p y f_S se igualan, el transformador de Tesla se encuentra en sintonía, condición que permite obtener la máxima tensión secundaria posible. Esto puede demostrarse teóricamente. En esta situación podemos escribir:

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_P C_P}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S C_S}} \quad (3)$$

De la igualdad (3) resulta:

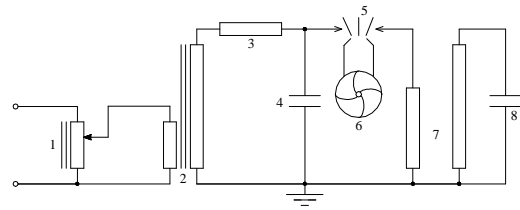
$$L_P C_P = L_S C_S \quad (4)$$

En la práctica, la sintonía se logra cuando se eligen L_P , C_P , L_S y C_S de tal forma que se cumpla la igualdad (4).

El objetivo de este trabajo fue el desarrollo de un generador de Tesla que permita ensayar materiales aislantes sometidos a altas tensiones de alta frecuencia, aumentando de esta forma las posibilidades del laboratorio.

Descripción experimental

La Fig. 2 muestra el circuito de un generador de Tesla, proyectado, montado y puesto en funcionamiento por el autor en el Laboratorio de Alta Tensión del INTI (octubre de 2005).



- (1) Autotransformador variable
- (2) Transformador elevador
- (3) Bobina de choque
- (4) Capacitor primario
- (5) Explosor estático
- (6) Grupo motocompresor
- (7) Transformador de Tesla
- (8) Capacidad propia de la bobina secundaria

Fig. 2: Circuito de un generador de Tesla de 1,3 MV

El primer componente que vemos en el circuito de la Fig. 2 es un autotransformador variable (1). Se trata de un autotransformador motorizado, de 60 kVA de potencia nominal, bifásico. Se alimenta con una tensión fija de 2x380 V y 50 Hz, y entrega una tensión variable entre 0 y 380 V.

El transformador elevador (2) es de tipo rural, bifásico, de relación 13200/231 V y potencia nominal de 10 kVA. En su uso habitual opera como transformador reductor de tensión, pero en este circuito debe operar como elevador de tensión.

La bobina de choque (3) atenúa los transitorios debidos a los cebados del explosor. Es una bobina con núcleo de aire, con una inductancia de 2 mH.

El capacitor (4) es de alta tensión, de 0,3 μ F.

Ahora veamos el explosor (5). Los electrodos de este explosor estático son cilindros de tungsteno puro, de 10 mm de diámetro, con sus bases circulares paralelas enfrentadas. La separación entre las bases enfrentadas (distancia de descarga de arco) es de 6,5 mm. Esta separación determina que el explosor se cebe con tensiones de polaridad positiva y negativa de 16,48 kV. Ambas tensiones fueron medidas con un divisor de tensión capacitivo y un osciloscopio digital.

La deionización del arco del explosor, necesaria para que se puedan renovar los procesos de carga y descarga del capacitor primario (4), se consigue por soplado del arco con aire comprimido.

El aire comprimido se produce con un grupo motocompresor (6). El soplado ayuda, también, a enfriar los electrodos del explosor, que deben conducir corrientes de 733 A de valor máximo o

amplitud.

La energía E_p , almacenada en el capacitor primario en cada proceso de carga, viene dada por:

$$E_p = \frac{1}{2} C_p U_c^2 = \frac{1}{2} \times 0,3 \times 10^{-6} F (16.480 V)^2 = 40,7 J \quad (5)$$

donde U_c es la tensión de cebado del explosor (de polaridad positiva o negativa).

Hemos visto que en cada segundo el explosor se ceba 100 veces, y cada vez que se produce un cebado, el capacitor primario se descarga en el arrollamiento homólogo del transformador de Tesla. Por lo tanto, la energía E puesta en juego en cada segundo está dada por:

$$E = 100 E_p = 100 \times 40,7 J = 4.070 J \quad (6)$$

Entonces, la potencia de excitación P del transformador de Tesla resulta:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{4.070 J}{1 s} = 4.070 W \quad (7)$$

Por último, veamos el transformador de Tesla (7). Como hemos dicho, se trata de un transformador sin hierro. La bobina primaria tiene un borne de conexión en cada extremo, y está provista de tomas de derivación. Esto permite elegir el valor de inductancia más apropiado para establecer la sintonía del transformador. La bobina secundaria tiene un borne de conexión en cada extremo, y una altura de 4 m. Ambas bobinas son cilíndricas y concéntricas.

Como caso particular, la sintonía fue establecida para el transformador de Tesla operando sin electrodo antiefluvio y en vacío. En este caso (ver la Fig. 1), la capacidad C_s es igual a la capacidad propia de la bobina secundaria solamente.

Para determinar la capacidad C_s se aplica la fórmula de Medhurst [2], [3]. La fórmula es la siguiente:

$$C_s = 0,1126 \times l + 0,08 \times D + \frac{0,27 \times D}{\sqrt{\frac{l}{D}}} \quad (8)$$

donde l es el largo del arrollamiento secundario en cm, y D es el diámetro del arrollamiento secundario en cm.

En este caso tenemos:

$$l = 380 \text{ cm}$$

$$D = 31,5 \text{ cm}$$

Con estos datos resulta:

$$C_s = 47,7 \text{ pF}$$

La inductancia de la bobina secundaria, L_s , es de 0,952 H.

La capacidad primaria, C_p , es de 0,3 μ F.

El valor de inductancia de la bobina primaria, L_p , elegido para establecer la sintonía, es de 151,4 μ H.

Con estos valores se cumple la condición de sintonía del transformador de Tesla ($L_p C_p = L_s C_s$).

Las frecuencias propias de oscilación primaria y secundaria vienen dadas por:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C_p}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} = f_s = 236 \text{ kHz} \quad (9)$$

Ahora bien, se puede demostrar que estando en sintonía, el transformador de Tesla entrega la máxima tensión de salida secundaria U_{SMAX} . De la teoría se sabe que la máxima tensión de salida secundaria viene dada por:

$$U_{SMAX} = U_c \sqrt{\frac{L_s}{L_p}} \quad (10)$$

Con los valores conocidos de U_c , L_s y L_p , podemos calcular U_{SMAX} . Resulta:

$$U_{SMAX} = 16480 V \sqrt{\frac{0,952 H}{151,4 \times 10^{-6} H}} = 1.307.000 V \quad (10)$$

Hecha la descripción del generador, veamos ahora cómo funciona.

Primeramente se conecta el grupo motocompresor.

Luego se conecta el autotransformador variable, y se eleva la tensión desde 0 volt hasta que se produzcan los cebados del explosor y las oscilaciones en los circuitos primario y secundario del transformador de Tesla. El terminal de alta tensión emite entonces, hacia el aire circundante, las llamadas descargas ramificadas de Tesla.

Transcurridos algunos segundos, se disminuye la tensión de salida del autotransformador, se produce el apagado del arco en el explosor, y cesan las oscilaciones y las descargas ramificadas.

Cuando la tensión llega a 0 volt se desconecta el autotransformador variable.

Por último, una vez que los electrodos del explosor se enfriaron lo suficiente, se desconecta el grupo motocompresor.

Resultados

La Fig. 3 muestra el generador de Tesla en pleno funcionamiento.

Fig. 3: Generador de Tesla de 1,3 MV en funcionamiento



Como se puede ver en la Fig. 3, este generador produce largas descargas ramificadas. Se registró un largo máximo de 2,5 m para estas descargas.

Cuando el generador de Tesla se debe utilizar para ensayar hojas aislantes, la capacidad C_s es naturalmente mayor. Esto obliga a elegir nuevos valores de C_p y L_p para mantener la condición de sintonía y obtener la máxima tensión de salida posible del transformador de Tesla.

Conclusiones

Este trabajo constituye un aporte a la capacidad de ejecución de ensayos de aislación en nuestro laboratorio, y permite extender las posibilidades del mismo.

Vale destacar que el equipo desarrollado está dirigido a un aspecto de la aislación que no está contemplado en otros laboratorios de alta tensión de nuestro país.

El autor expresa un profundo agradecimiento al Ing. Juan Carlos Rangugni, de COMPAÑÍA ARGENTINA DE TRANSFORMADORES, por la fabricación de ambas bobinas del transformador de Tesla, y agradece también la eficaz colaboración de Claudio Recchia, por el tipiado de este trabajo, por el trazado de los circuitos, y por su asistencia en la preparación del poster.

Referencias

- [1] N. Hardt, D. Koenig, "Testing of insulating materials at high frequencies and high voltage based on the Tesla transformer principle", Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Arlington, Virginia, USA, June 7-10, 1998, pp 517-520.
- [2], [3] R. G. Medhurst, "H. F. resistance and self-capacitance of single-layer solenoids", Wireless engineer, February 1947 (pp 35-43), March 1947 (pp 80-92).

Para mayor información contactarse con:
Mario A. Pecorelli - marapeco@inti.gov.ar